



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## VÝVOJOVÝ PROSTŘEDEK PRO LOKALIZACI

DEVELOPMENT LOCALIZATION BOARD

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Szabó

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

BRNO 2021

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Michal Szabó

**ID:** 195436

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vývojový prostředek pro lokalizaci

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a vytvořte zařízení umožňující sledování polohy pomocí modulu GPS a také pomocí akcelerometru a gyroskopu. Zařízení bude umožňovat čtení dat z vhodného modulu GPS, zaznamenávat je a dále zpracovávat. Zároveň bude umožněn výpočet trasování pomocí akcelerometrického a gyroskopického MEMS senzoru. Naměřená data budou ukládána na paměťovou kartu pro analýzu a vizualizaci naměřených dat na počítači. Celý systém bude navržen pro testování výpočtů polohy, a také pro detekci a kvantifikaci odchylek naměřených hodnot jednotlivými moduly. Pomocí tohoto systému lze v budoucnu testovat vhodné korekční algoritmy vedoucí ke zpřesnění měřených výsledků.

V rámci diplomové práce prostudujte dotčené technologie, popište je a navrhněte topologii zařízení. Dále zvolte vhodnou součástkovou základnu, zdůvodněte její použití a navrhněte schéma zapojení celého zařízení. Vytvořte modul obsahující zmíněné komponenty, zprovozněte jej a vytvořte obslužný program pro komunikaci s periferiemi. Závěrem proveďte sérii testovacích měření, jejichž výsledky analyzujte, zhodnoťte a kvalifikovaně popište v textové části diplomové práce.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 25.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

**doc. Ing. Lukáš Fujcik, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Dokument popisuje zariadenie, ktoré meria dáta o geografickej polohe pomocou GNSS modulu a sníma zmenu polohy pomocou akcelerometru a gyroskopu. Schopnosti týchto obvodov sú skombinované tak, že dáta z nich spracováva a zlučuje pomocou numerickej integrácie a matematických filtrov a výsledky sú ukladané na pamäťovú kartu. Celý vývoj zariadenia je popísaný od konceptu, cez zhotovenie a softvérové algoritmy až po testovanie funkcií.

## **Kľúčové slová**

Nucleo, STM32, malá spotreba, GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, akcelerometer, gyroskop, IMU, MEMS, akumulátor, NMEA, pamäťová karta, Kalmanov filter

## **Abstract**

This document describes a device capable to determine geographical position thanks to its GNSS module and measure the change of movement with the help of an accelerometer and gyroscope. Outputs of these integrated circuits are combined, data are processed and fused thanks to a numerical integration and mathematical filters. Results are stored on a memory card. The whole development is described from a concept, through the making of the device and software algorithms to the testing of its functions.

## **Keywords**

Nucleo, STM32, low-power, GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, Accelerometer, Gyroscope, IMU, MEMS, rechargeable battery, NMEA, memory card, Kalman filter

## **Bibliografická citácia**

SZABÓ, Michal. *Vývojový prostředek pro lokalizaci* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134653>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Vladimír Levek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Michal Szabó
<b>VUT ID studenta:</b>	195436
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2020/21
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Vývojový prostředek pro lokalizaci

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25. května 2021

-----  
podpis autora

## Pod'akovanie

Ďakujem môjmu vedúcemu diplomovej práce, doktorovi Ing. Vladimírovi Levkovi, Ph.D. za odbornú pomoc, dobré rady a ochotu viesť prácu napriek nepriaznivým podmienkam, v ktorej vznikala. Pod'akovanie taktiež patrí kolegovi Bc. Martinovi Rejtharovi za jeho podporu v časoch, kedy táto práca vyžadovala najviac úsilia. Jemu a kolegovi Bc. Vojtechovi Zgrebňákovi patrí vďaka za pomoc pri experimentoch. Ďakujem Ing. Lukášovi Novákovi za asistenciu pri spájkovaní bezvývodových komponentov.

V Brne dňa: 25. mája 2021

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV.....</b>	<b>9</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK.....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>1. TEÓRIA POUŽITÝCH TECHNOLOGÍ.....</b>	<b>14</b>
1.1 SATELITNÉ URČOVANIE POLOHY .....	14
1.1.1 <i>Navstar GPS</i> .....	15
1.1.2 <i>GLONASS</i> .....	16
1.1.3 <i>Galileo</i> .....	17
1.1.4 <i>BeiDou, NavIC a ďalšie</i> .....	17
1.2 AKCELEROMETER .....	20
1.3 GYROSKOP .....	21
1.4 JEDNOTKA MERANIA ZOTRVAČNOSTI .....	22
1.5 BATÉRIOVÉ NAPÁJANIE .....	22
1.6 RIADIACA JEDNOTKA .....	24
1.6.1 <i>Arduino (Atmel AVR)</i> .....	24
1.6.2 <i>Microchip PIC</i> .....	25
1.6.3 <i>MSP430</i> .....	25
1.6.4 <i>STM32 Nucleo (ARM)</i> .....	25
1.6.5 <i>Raspberry Pi</i> .....	26
1.6.6 <i>FPGA/CPLD</i> .....	26
1.7 UKLADANIE A ODOSIELANIE DÁT .....	27
1.8 NUMERICKÉ METÓDY .....	28
1.9 NUMERICKÉ FILTRE.....	30
<b>2. NÁVRH KONŠTRUOVANÉHO ZARIADENIA .....</b>	<b>32</b>
2.1 VÝVOJOVÝ KIT .....	32
2.2 GNSS MODUL.....	34
2.3 ĎALŠIE KOMPONENTY .....	35
2.4 TOPOLOGIA ZARIADENIA .....	36
2.5 CIEĽOVÉ PARAMETRE ZARIADENIA .....	37
<b>3. VLASTNÉ RIEŠENIE PROBLÉMU .....</b>	<b>38</b>
3.1 OBVODOVÝ NÁVRH .....	38
3.2 NÁVRH DPS .....	42
3.3 VÝROBA, OSADENIE, OVERENIE FUNKČNOSTI .....	43
3.4 KOMUNIKAČNÉ PROTOKOLY A PRÍKAZY .....	47
3.5 RIADIACI PROGRAM .....	57
<b>4. PRAKTICKÉ SKÚŠKY .....</b>	<b>67</b>
4.1 TESTY PRI CHÔDZI .....	68
4.2 TESTY AUTOMOBILOM.....	74
4.3 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV .....	80
<b>5. ZÁVER.....</b>	<b>81</b>

<b>LITERATURA.....</b>	<b>83</b>
<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK .....</b>	<b>87</b>
<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>90</b>



# ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1 Náčrt fungovania trilateralizácie zo 4 satelitov – prevzaté z [3] .....	15
1.2 Logo Navstar GPS – prevzaté z [4] .....	16
1.3 Logo systému GLONASS – prevzaté z [5] .....	17
1.4 Logo systému Galileo – prevzaté z [6] .....	17
1.5 Logo systému BeiDou – prevzaté z [7] .....	18
1.6 Prehľad vzdialeností orbít voči Zemi – prevzaté z [2] .....	18
1.7 Pokryté územie službou NavIC – prevzaté z [8] .....	19
1.8 Logo systému QZSS – prevzaté z [9] .....	19
1.9 MEMS akcelerometer nasnímaný elektrónovým mikroskopom – prevzaté z [12] .....	21
1.10 Jednotka merania zotrvačnosti a osy, ktoré meria – prevzaté z [15] .....	22
1.11 Vývojová platforma Arduino Uno – prevzaté z [19] .....	24
1.12 Najmenší mikrokontrolér od Microchip – prevzaté z [20] .....	25
1.13 Vývojová platforma Raspberry Pi 4 model B – prevzaté z [21] .....	26
1.14 Mapa pokrytia ČR systémom LoRa – prevzaté z [24] .....	27
1.15 Obdĺžniková metóda interpolačnej funkcie – prevzaté z [25] .....	29
1.16 Lichobežníková metóda interpolačnej funkcie – prevzaté z [25] .....	29
1.17 Simpsonová metóda interpolačnej funkcie – prevzaté z [25] .....	30
1.18 Schematické znázornenie Kalmanovho filtru – prevzaté z [34] .....	31
2.1 Vývojový kit NUCLEO-L476RG – prevzaté z [26] .....	32
2.2 Produktová línia vývojových kitov Nucleo – prevzaté z [25] .....	33
2.3 GNSS modul Quectel L96 – prevzaté z [41] .....	34
2.4 9-osé IMU Bosch BMX160 – prevzaté z [40] .....	35
2.5 Topologický návrh zariadenia .....	36
3.1 Detail schémy filtrácie napájacieho napätia .....	39
3.2 Zapojenie 9-osého IMU BMX160 .....	40
3.3 Použité signalizačné a ovládacie prvky a ich zapojenie .....	40
3.4 Zapojenie modulu GNSS vrátane komunikácie, riadenia a napájania .....	41
3.5 Rozloženie komunikačných periférií na konektory zbernice Nucleo .....	41
3.6 Podmienky pre umiestnenie a okolie modulu Quectel L96 na DPS podľa výrobcu – prevzaté z [45].	42
3.7 Umiestnenie GNSS modulu na návrhu DPS .....	43
3.8 DPS od výrobcu JLCPCB .....	44
3.9 Zariadenie po osadení komponentami .....	45
3.10 Nastavenie sériového portu GNSS podľa výrobcu .....	46
3.11 Ukážka prijatej správy preposlanej do PC .....	46
3.12 Shield po úprave kvôli chýbajúcemu pinu pre detekciu MicroSD karty .....	47
3.13 Čítanie dát zbernicou SPI v režime 11 – prevzaté z [43] .....	53
3.14 Vývojový diagram hlavného programu main s podmienkami skoku do podprogramov .....	58
3.15 Vývojový diagram rutiny, ktorá z platného dátumu a času vytvorí názov súboru, vytvorí súbor a naplní ho počiatočnými informáciami .....	59
3.16 Vývojový diagram podprogramu pre generovanie záznamu polohy a zápis do súboru .....	60
3.17 Vývojový diagram úvodných rutín na nastavenie periférie .....	61
3.18 Rozdeľované dáta v správe xxRMC do jednotlivých premenných .....	62
3.19 Vývojový diagram rutiny na triedenie znakov prichádzajúcich po linke UART .....	63
3.20 Dátový tok po sériovej linke UART .....	64
3.21 Vysielanie dát po zbernici UART pravidelne každú sekundu .....	64

3.22 Zachytená obrazovka osciloskopu, ktorá ukazuje hodinový signál (žltá čiara) a signál výberu čipu (zelená čiara) .....	65
3.23 Zachytená obrazovka osciloskopu, ktorá ukazuje hodinový signál (žltá čiara) a dátový vstup (zelená čiara) .....	65
3.24 Zachytená obrazovka osciloskopu, ktorá ukazuje hodinový signál (žltá čiara) a dátový výstup (zelená čiara), ktorý je neustále v log. 0 .....	66
4.1 Zariadenie počas praktických skúšok v aute .....	67
4.2 Praktické skúšky zariadenia v reálnych podmienkach .....	68
4.3 Umiestnenie zariadenia pri prvom meraní stacionárnej polohy .....	69
4.4 Zaznamenaná poloha zariadenia počas celej doby prvého stacionárneho merania, zmeraná poloha vyznačená červenou čiarou a skutočná poloha zeleným kruhom .....	69
4.5 Zaznamenaná poloha zariadenia po odfiltrovaní doby ustálenia prvého stacionárneho merania, zmeraná poloha vyznačená červenou čiarou a skutočná poloha zeleným kruhom .....	70
4.6 Zaznamenaná poloha zariadenia na niekoľkých stacionárnych miestach, zmeraná poloha vyznačená žltým špendlíkom a skutočná poloha zeleným kruhom .....	70
4.7 Nastavenie bodu stredu kružnice a vyznačenie polomerov 10 a 20 m na mape .....	71
4.8 Experiment chôdze po kružnicovej dráhe .....	72
4.9 Test chôdze po kružnici s polomerom 5 m (zelene) a namerané výsledky (červene) .....	72
4.10 Test chôdze po kružnici s polomerom 10 m (zelene) a namerané výsledky (červene) .....	73
4.11 Vozidlo pohybujúce sa na hrane asfaltu po priamočiarej trajektórii .....	74
4.12 Obrázky zobrazujúce dve merania dráhy, meranie priamočiarej dráhy vozidla (hore) s vyznačenými skutočnými bodmi začiatku a konca merania a meranie slalomu na tej istej trati (dolu) .....	75
4.13 Jazda automobilom po kružnicovej dráhe .....	75
4.14 Dráhy zamerané pri jazde automobilom okolo kruhového objazdu (zelená čiara) záznamy o polohe pri rýchlostiach 5 km/h (vľavo hore), 10 km/h (vpravo hore), 15 km/h (vľavo dole) a 20 km/h (vpravo dole) .....	76
4.15 Trasa rýchlostnej cesty a diaľnice, na ktorej sa skúšali vplyvy vysokej rýchlosti na trasovanie .....	77
4.16 Úsek trasy, na ktorom je spočítaná dosiahnutá rýchlosť 140 km/h .....	77
4.17 Trasa nameraná na Brnenskom mestskom okruhu .....	78
4.18 Obnovenie trasovania po výstupe z Kráľovopolského tunelu .....	78
4.19 Prerušenie signálu mostom a efekt zotrvačnosti GNSS modulu .....	79
4.20 Kombinácia faktorov prechodnej straty signálu a malého polomeru otáčania dráhy .....	79

# ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Porovnanie jednotlivých polohovacích systémov [4][5][6][7][8][9] .....	20
Tabuľka 2 Porovnanie jednotlivých typov akumulátorov – prevzaté z [16] .....	23
Tabuľka 3 Porovnanie vybraných GNSS modulov [28][29][30][31] .....	34
Tabuľka 4 Výpis základných požadovaných parametrov zariadenia [45][43][47] .....	37
Tabuľka 5 Predpony správ v štandardizovanej komunikácii NMEA – prevzaté z [46] .....	48
Tabuľka 6 Štruktúra štandardnej NMEA správy – prevzaté z [46] .....	48
Tabuľka 7 Štruktúra štandardného PMTK príkazu/odpovede – prevzaté z [46] .....	49
Tabuľka 8 Zoznam PMTK príkazov použitých v programe s hodnotami –prevzaté z [46] .....	50
Tabuľka 9 Zoznam funkcií FATFS, ktoré boli použité v tomto projekte – prevzaté z [49] .....	52
Tabuľka 10 Zoznam dôležitých registrov integrovaného obvodu BMX160 [43] .....	55
Tabuľka 11 Presnosť senzorov BMX160 v jednotlivých rozsahoch – prevzaté z [43] .....	56
Tabuľka 12 Možné nastavenia frekvencie dátového výstupu senzorov s medznými frekvenciami filtra dolnej priepuste – prevzaté z [43] .....	57
Tabuľka 13 Zoznam najbežnejších formátov geografických súradníc – prevzaté z [50] .....	61

# ÚVOD

Potreby globálneho obchodu vytvárajúci globálny trh zmenšili našu planétu na svet, kde žiaden trh nie je cudzí. Potreba taktickej výhody voči súperiacej strane znamenala enormný hlad po technologickom pokroku. Všetky tieto faktory prispeli k tomu, že boli za krátky čas vyvinuté technológie, ktoré dokážu lokalizovať a navigovať lepšie, než to dokázali profesionáli, čím eliminovali používanie máp a kompasu, ktoré boli stovky rokov na tieto účely používané. Miniaturizácia umožnila vytváranie zložitých integrovaných obvodov a mechanických štruktúr na mikroskopickej úrovni, ďaleko presahujúce presnosť ručnej práce a zároveň ich vyrábať strojovo, vo veľkých počtoch s nemennou úrovňou kvality. Cena týchto komponentov je pritom nižšia, než by stál kompas a mapa.

Táto práca vyžaduje preštudovanie technológií, ktoré sa skrývajú za týmto pokrokom, vysvetľuje ich funkciu a uvádza príklady ich realizácie a použitia v praxi. Každé zo spomenutých zariadení sa dá dnes zakúpiť v integrovanej podobe, pripravené poskytovať informácie okamžite po pripojení a nahratí obslužného programu. Bez nutnosti poznať a rozumieť komplexným matematickým výpočtom, ktoré vo svojom jadre spracovávajú. Navrhla sa topológia zariadenia. Tá bola použitá ako základ pre schematický návrh a návrh DPS. Doska plošných spojov sa vyrobila a osadila sa objednanými komponentmi. Aby sa splnili požiadavky teoretickej časti, napísal sa softvér a v texte sa popísala jeho funkcia. V závere sa kompletne zariadenie vyskúšalo sériou testov, ktoré overili všetky jeho vlastnosti a schopnosti.

Prvá kapitola diplomovej práce popisuje jednotlivé technológie, ktoré umožňujú získanie polohy na planéte a jednotlivé služby, ktoré dnes túto funkciu ponúkajú. Ďalej sa popisujú zariadenia na lokálne snímanie zrýchlenia a natočenia vo všetkých osiach. Tieto informácie dohromady dávajú obraz o zmene polohy meranej z pohľadu samotného zariadenia a je ich možno porovnávať s informáciami zo satelitného zameriavania. Na napájanie celého konceptu sú rozobrané niektoré druhy akumulátorov ako zdrojov napájania a spôsoby odosielanie informácií na vzdialené úložisko bezdrôtovými technológiami, ale taktiež ukladanie dát do lokálnej pamäte. Popísali sa matematické princípy, ktoré budú využité pri spracovaní údajov zo všetkých použitých senzorov.

V druhej kapitole sa navrhuje konkrétne topologické riešenie zariadenia. Je vybraných niekoľko konkrétnych zariadení a porovnávajú sa ich vlastnosti. Vybrali sa z nich najvhodnejšie zariadenia pre tento projekt a výber sa odôvodnil. Náčrt zariadenia nakoniec ilustruje, aké komponenty bude treba zabezpečiť a akým spôsobom medzi nimi bude prebiehať komunikácia. Podľa použitých komponentov sa spísali požadované parametre finálneho zariadenia.

V tretej kapitole sa popísalo, ako bolo zariadenie navrhnuté a skonštruované. Uviedli sa detaily obvodového návrhu a zdôvodnili sa konkrétne umiestnenie komponentov na doske plošných spojov spolu s jej rozmermi a spôsobom pripojenia. Popísal sa postup pri

objednávaní komponentov a DPS, ktoré sú zostavené do zariadenia. Zariadenie bolo oživené, každý komponent sa otestoval, či bol funkčný. Napísal sa riadiaci softvér, ktorý vykonával prijímanie dát zo senzorov, spracovával ich a poskytoval výsledky na uloženie alebo odoslanie.

V poslednej kapitole sa vyrobené zariadenie vyskúšalo a podľa toho sa určilo, či funguje ako bolo predpokladané a či má správne parametre. Testy vyskúšali vlastnosti zariadenia v statických a dynamických testoch, v sťažených podmienkach a extrémnych prípadoch, ktorým by mohlo byť vystavené. Zhrnuli sa výsledky meraní a na ich základe sa navrhli možné spôsoby využitia a možnosti ďalšieho rozvoja zariadenia.

# 1. TEÓRIA POUŽITÝCH TECHNOLOGIÍ

Táto kapitola zoznamuje s technológiami lokalizácie a zisťovania polohy na planéte, meraním zrýchlenia pomocou akcelerometrov a zmeny polohy pomocou gyroskopu. Všetky tieto technológie majú vďaka moderným integrovaným obvodom miniatúrne rozmery. Preto sa táto práca zameriava na možnosť ich vzájomnej integrácie a spolupráce v kohéznom systéme, v ktorom sa globálne merané veličiny ako poloha a nadmorská výška môžu spresňovať použitím senzorov merajúcich lokálne veličiny ako zmena rýchlosti a gyroskopická poloha. Okrem toho systém môže fungovať aj opačnom režime, v ktorom bude vyhodnocovať chybu merania geografickej polohy z dát od akcelerometru a gyroskopu. Aby merané dáta mohli byť komplexnejšie vyhodnocované, nebude chýbať ani možnosť ich posielat' na vzdialený server, ktorý môže poskytnúť lepší prehľad z dlhšieho merania. Keďže sa predpokladá, že merania budú viac prebiehať v priestoroch mimo základné siete, či už napájacie alebo komunikačné, bude vhodné prispôbiť zariadenie na prácu v režime šetrenia energie a maximalizovať možnú dobu výdrže batériového napájania.

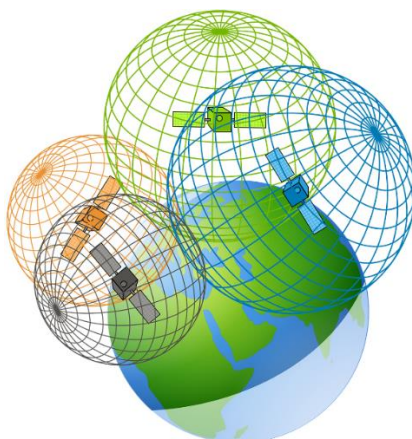
## 1.1 Satelitné určovanie polohy

Funkcia satelitného polohovacieho systému je založená na prijímaní dát zo satelitov na oblohe. Každý zo satelitov v sebe obsahuje veľmi presné atómové hodiny, ktoré sú synchronizované nielen voči ostatným satelitom ale aj voči pozemným staniciam. Každý satelit vysiela údaje o svojom palubnom čase, svojej vlastnej polohe a polohe voči ostatným satelitom k Zemi. Na určovanie polohy musia byť pre prijímač viditeľné aspoň 4 satelity. Keď získa dáta od dostatočného počtu satelitov, môže začať vykonávať výpočty, ktoré určia polohu zariadenia. Keďže dáta o čase, v akom bol signál z družice odoslaný sú veľmi presné, môžeme z rozdielu medzi časom odoslania a časom prijatia po vynásobení rýchlosťou svetla získať vzdialenosť zariadenia od družice. Treba však predpokladať, že zariadenie koncového užívateľa nemá tak presný zdroj času akým sú atómové hodiny vstavené v družici. Počíta sa tým, že toto zariadenie má hodnotu času posunutú o určitú pevnú konštantu pre všetky prijaté signály zo všetkých satelitov, ktorú treba zistiť. Na určenie polohy je potrebné zistiť hodnotu 4 neznámych:

- zemepisná šírka
- zemepisná dĺžka
- nadmorská výška
- časová odchýlka.

Preto sú potrebné 4 satelity, aby bolo možné vyplniť 4 rovnice o 4 neznámych. Vizualizácia je na obrázku 1.1. Presnosť merania je veľmi závislá na presnosti meraného času. Preto sú všetky družice vybavené atómovými hodinami. Ich presnosť je v ráde nanosekúnd a s vekom sa zhoršuje. Ich aktuálna presnosť je približne 100 ns za deň.

Najväčší vplyv na presnosť časového údaju má ionosféra, nachádzajúca sa vo výške medzi 60 km a 2000 km na zemskom povrchu. Obsahuje voľné elektróny v dostatočnom množstve, aby interferovali s elektromagnetickými vlnami a spomaľovali ich. Rozdiel jednej nanosekundy v nameranom čase stačí na to, aby bola výsledná poloha posunutá o 30 cm. Tento efekt je redukovaný skrátením dráhy, ktorú musia elektromagnetické vlny signálu prekonať na ceste cez ionosféru. Presnejšie výsledky polohy teda prichádzajú zo satelitov ktoré sú kolmo nad povrchom Zeme voči zariadeniu oproti satelitom nad horizontom. Technicky sa tento nedostatok rieši paralelným vysielaním dvoch vln na inej blízkej frekvencii. Využíva sa podobný efekt ako pri školských pokusoch. Dva lúče s rôznymi vlnovými dĺžkami sa pri zmene hustoty optického prostredia budú lámať pod iným uhlom. Ak poznáme ich rozdiel uhlu lomu, môžeme vypočítať ich rozdiel vlnových dĺžok. Pri meraní oneskorenia medzi dvomi elektromagnetickými vlneniami so známymi frekvenciami môžeme vypočítať koeficient rozdielu ich oneskorenia a je možné ho teda vykompenzovať vo výpočte. Táto metóda kompenzuje aj chybu spôsobenú odrazmi od objektov, ktoré zapríčinia oneskorenie jedného zo signálov. [1][2][4]



Obrázok 1.1 Náčrt fungovania trilateralizácie zo 4 satelitov – prevzaté z [3]

Ďalším zdrojom nepresnosti je reálna aplikácia teórie relativity. Hodiny tikajúce na palube satelitu pohybujúceho sa rýchlosťou 3,9 km/s voči Zemi budú tikieť pomalšie, než hodiny pozemské. Tento rozdiel vychádza na 7,214  $\mu$ s za deň. Väčší efekt však má všeobecná teória relativity. Tá hovorí, že čas sa v blízkosti hmotných telies spomaľuje. Atómové hodiny na palube satelitu idú preto rýchlejšie o 45,9  $\mu$ s za deň. Ak by sa tieto odchýlky nekompensovali, tak chyba merania by za jeden deň narástla o 10 km. Preto je frekvencia atómových hodín na palube znížená, aby tento rozdiel kompenzovala. [4]

### 1.1.1 Navstar GPS

GPS je satelitný polohovací systém založený na sieti satelitných vysielateľov na zemskej orbite. Logo na obrázku 1.2. Konkrétne je to stredná zemská orbita vo výške približne 20 180 km nad zemským povrchom. Tento systém dokáže vďaka systému trilateralizácie

a výpočtu časovej odchýlky určiť polohu na Zemi. Pôvodne mal byť použitý ako americký vojenský navigačný systém. Jeho budovanie sa začalo v roku 1972 pod názvom Navstar GPS a do plnej prevádzky sa dostal v roku 1993, kedy počet satelitov na oblohe bol zvýšený na 24.

Od 80. rokov 20. storočia bol systém Navstar GPS sprístupnený pre verejnosť, ktorá ho mohla začať využívať s civilnými lokačnými zariadeniami. Jeho presnosť však bola umelo znižovaná oproti vojenským užívateľom. Postupná modernizácia a potreba presnej lokalizácie aj v husto obývaných oblastiach nakoniec vyústila k zrovnoprávneniu všetkých užívateľov systému 1.mája.2000. Presnosť sa zvýšila z predchádzajúcich cca. 100 m na dnešné jednotky metrov až desiatky centimetrov. [4]



Obrázok 1.2 Logo Navstar GPS – prevzaté z [4]

V súčasnosti má systém 31 aktívnych satelitov. Americká vláda má však neustále plnú kontrolu nad celým systémom a môže podľa okamžitej potreby meniť jeho funkčnosť. Či už lokalizovane znižovať jeho presnosť alebo úplne odňať prístup. Príkladom takéhoto postupu je vojna medzi Pakistanom a Indiou v roku 1999, tzv. Kargilská vojna. Preto sa krajiny, ktoré na to majú dostatok prostriedkov, snažia vybudovať podobné polohovacie systémy, ktoré by mohli slúžiť na vojenské, ale aj civilné účely bez dosahu americkej vlády. Najznámejšie sú systémy GLONASS vybudovaný Ruskou federáciou a systém Galileo vybudovaný Európskou úniou. Podobnými systémami sú indický NavIC a čínsky BeiDou NST. [4]

### 1.1.2 GLONASS

GLONASS je polohovací systém podobný systému GPS. Logo je na obrázku 1.3. Ich hlavnou podobnosťou je určenie. Pôvodne bol tento systém založený Sovietskym zväzom v 70. rokoch 20. storočia ako vojenský polohovací systém. Plnú funkčnosť dosiahol v polovici 90. rokov, avšak nie pre civilné účely a kvôli nedostatku financií prestal byť ďalej vyvíjaný a udržiavaný. V novom tisícročí sa vláda Ruskej federácie rozhodla systém modernizovať a sprístupniť civilnému užívaniu. Pôvodne GLONASS používal kódovanie signálu metódou FDMA, frekvenčne delený multiplex. Toto kódovanie je nevhodné pre takúto aplikáciu, pretože je náchylné na interferenciu jednotlivých vysielacích kanálov a preto potrebuje väčšiu šírku pásma. Počas modernizácie GLONASS začal vysielat' aj v kódovaní CDMA, kódovo delený multiplex, podobne ako systém GPS. V roku 2010 bol systém funkčný na území Ruskej federácie



a o rok neskôr celosvetovo. 24 aktívnych satelitov obieha na strednej zemskej orbite vo výške 19 130 km. Udávaná presnosť samotného systému GLONASS je 2,3 až 7,4 metra, čo je menej presné ako systém GPS.



Obrázok 1.3 Logo systému GLONASS – prevzaté z [5]

Keďže však zariadenia používajúce systém GPS môžu prijímať signál aj od satelitov GLONASS, zvyšuje sa počet satelitov na oblohe dvojnásobne a ich spoluprácou sa dosahujú udávané centimetrové presnosti a zvýšená rýchlosť zamerania. GLONASS má taktiež lepšiu presnosť v lokalitách blízko zemských pólů než GPS. Mobilné telefóny začali integrovať podporu GLONASS od roku 2011, aby tak zlepšili pokrytie pre zákazníkov na celosvetovom trhu. [5]

### 1.1.3 Galileo

Polohovací systém Galileo bol založený Európskou úniou pod záštitou Európskej vesmírnej agentúry. Logo je na obrázku 1.4. Na rozdiel od predchádzajúcich jeho prvotný účel nebol vojenský, ale úplne civilný. Má zlepšovať a pokrytie a presnosť na európskom území, ktoré je hustejšie zastavané. Výstavba začala v roku 2011 a v obmedzenej prevádzke začal systém fungovať v roku 2016. V súčasnosti má funkčných 22 satelitov obiehajúcich na strednej zemskej orbite vo výške 23 222 km. [6]



Obrázok 1.4 Logo systému Galileo – prevzaté z [6]

Ponúka presnosť zamerania menej ako jeden meter pre všetkých užívateľov a pre platiacich užívateľov ponúka šifrovanú úroveň zamerania s presnosťou až 1,6 cm. Okrem toho podporuje funkciu prijímania signálov z osobných núdzových rádiomajákov a na rozdiel od podobných služieb podporuje aj spätné potvrdenie prijatia signálu. [6]

### 1.1.4 BeiDou, NavIC a ďalšie

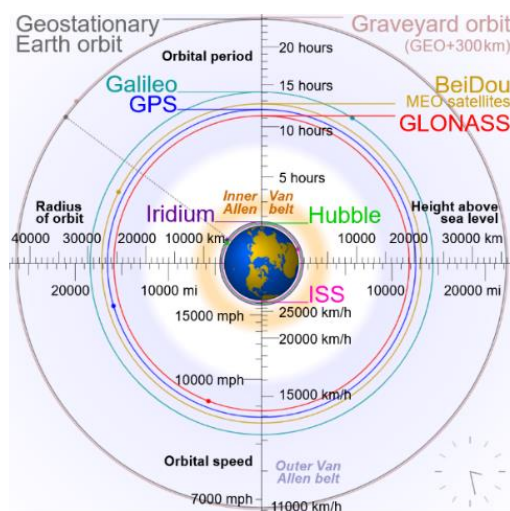
V posledných rokoch zaznamenala Čínska ľudová republika rozmach životnej úrovne a s tým spojené aj zvýšenie investícií do nových technológií. Aby mala vojenská a vládna moc k dispozícii vlastný polohovací systém, začala v novom tisícročí budovať vlastný

satelitný polohovací systém pod názvom BeiDou. Meno dostal po súhvezdí Veľký voz vyjadreného v čínštine, ktorý je vyobrazený aj v logu na obrázku 1.5. Pôvodne mal byť čínsky systém plne prepojený s európskym projektom Galileo, ale pre nespokojnosť čínskej strany s jej úlohou v danom projekte sa nakoniec osamostatnili. Systém bol postupne spúšťaný v troch fázach technológie a pokrytia. V prvej fáze, ktorá trvala v rokoch 2000 až 2012 systém BeiDou disponoval tromi satelitmi, ktoré oproti ostatným polohovacím službám obiehali na geostacionárnej orbite, t.j. vo výške 35786 km nad povrchom Zeme. Vďaka väčšej vzdialenosti stačili na pokrytie územia Čínskej ľudovej republiky a priľahlého územia len tri satelity. Udávaná presnosť zariadení, ktoré boli schopné prijímať navigačné dáta bola 20 m pre kalibrované zariadenia a 100 m pre nekalibrované zariadenia. [7]



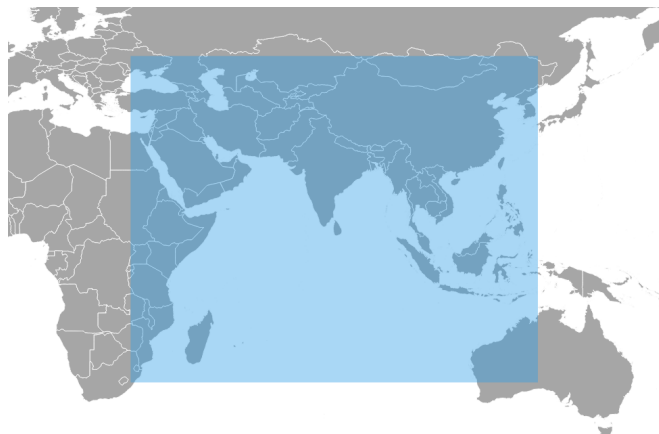
Obrázok 1.5 Logo systému BeiDou – prevzaté z [7]

Druhá fáza bola technologickým pokrokom a plne nahradila zariadenia z fázy prvej. Systém, ktorý bol tiež prezývaný COMPASS pozostával z 30 satelitov, pričom 27 ich bolo na strednej zemskej orbite a 3 na geosynchronnej orbite. Najpresnejšie zameranie dosahoval v oblasti, ktorá sa rozlieha od zakaukasskej oblasti až po oceániu, vrátane Austrálie a Nového Zélandu. V tejto oblasti dosahoval presnosti približne 10 m pre civilné použitie a 10 cm pre vojenské použitie. Plnej funkcie dosiahol v roku 2012. Posledná fáza má pokrytie služby rozšíriť celosvetovo. V polovici roku 2020 bola sieť satelitov dokončená, pričom má k dispozícii 35 satelitov na oblohe. [7]



Obrázok 1.6 Prehľad vzdialeností orbít voči Zemi – prevzaté z [2]

NavIC je indický navigačný systém vyvinutý po vojnových udalostiach v Kargilskom regióne. Pozostáva z 8 satelitov, pričom päť z nich je na geosynchronnej orbite a zvyšné sú na geostacionárnej orbite. Jeho udávaná presnosť je lepšia než desať metrov na pevnine a lepšia než 20 metrov v Indickom oceáne. Jeho pokrytie zatiaľ nie je celosvetové, v súčasnosti je možné jeho použitie na Indickom polostrove a jeho širokom okolí, podrobne na mape na obrázku 1.7. [8]



Obrázok 1.7 Pokryté územie službou NavIC – prevzaté z [8]

QZSS, tiež známy ako Michibiki, je pozičný systém budovaný japonskou vládou, logo je na obrázku 1.8. Je úplne kompatibilný so systémom GPS a jeho účelom je zvýšiť presnosť amerického systému v miestach s hustou zástavbou a mnohoposchodovými mrakodrapmi, ktorých je práve v Japonsku veľký počet.



Obrázok 1.8 Logo systému QZSS – prevzaté z [9]

Prevádzka bola spustená v roku 2018 a operuje s najzákladnejšou možnou zostavou štyroch satelitov. V najbližších rokoch sa plánuje vylepšenie služby až na sedem satelitov. Celá služba pracuje v troch módoch, ten s najväčším pokrytím, ktorý okrem Japonska zahŕňa aj Oceániu a časť Austrálie má presnosť v jednotkách metrov. Presnejší, ktorý pokrýva japonský ostrov a jeho vzdialené pobrežie má presnosť lepšiu než jeden meter. Ten najpresnejší funguje len na japonskom ostrove s udávanou presnosťou v jednotkách centimetrov. Zaujímavosťou tohto systému je, že v najbližšom období sa bude experimentovať so satelitmi, ktoré nebudú vybavené presnými atómovými hodinami. Budú obsahovať len klasický zdroj hodín z quartz kryštálu, avšak chyba bude pravidelne napravnovaná pozemnými stanicami. Tento systém využíva fakt, že jeho satelity

sú v neustálom spojení s pozemnými stanicami a tak je možné pravidelne opravovať časovú odchýlku. Výhodou tohto prístupu je zníženie hmotnosti a ceny satelitov vypúšťaných na zemskú orbitu. [9][10]

Tabuľka 1 uvádza základné informácie o všetkých pozičných systémoch dostupných v režimoch pre civilné obyvateľstvo.

Tabuľka 1 Porovnanie jednotlivých polohovacích systémov [4][5][6][7][8][9]

Systém	Počet aktívnych satelitov	Presnosť	Pokrytie
GPS	31	1 m – 30 cm	globálne
GLONASS	24	4 m – 2 m	globálne
Galileo	24	± 1 m	globálne
BeiDou	35	3,6 m / 2,6 m	globálne / Ázia
NavIC	8	1 m	India + 1600 km okolia
QZSS	4	<10 m / <1 m / <10 cm	Japonsko + Oceánia / Japonsko + jap. pobrežie / japonská pevnina

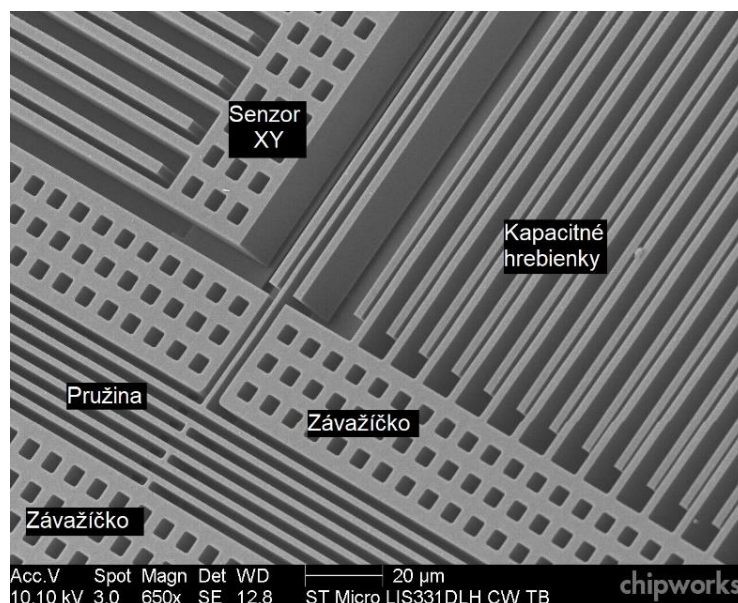
Z tabuľky je jasné, že v našej zemepisnej polohe je možné získavať signál z rôznych polohovacích systémov. Zvýši sa tým nielen presnosť, ale aj rýchlosť zamerania. Zároveň sa zvyšuje pravdepodobnosť, že polohovacie zariadenie získa signál zo štyroch potrebných satelitov, keďže niektoré systémy sú schopné priamej spolupráce.

## 1.2 Akcelerometer

Akcelerometer je zariadenie, ktoré je schopné merať zrýchlenie. Toto zrýchlenie môže byť spôsobené gravitačnými účinkami alebo zmenou zrýchlenia pôsobením inej cudzej sily. Obidve metódy sú využívané nielen v odbornej praxi ale aj v spotrebnej elektronike. Najčastejšie sú používané v mobilných telefónoch a podobných zariadeniach na správnu orientáciu obrazovky voči jej natočeniu užívateľom, kde sa meria smer gravitačného zrýchlenia. Ďalším častým využitím je v automobiloch vybavených systémom nafukovacích vakov, kde vyhodnocujú náhle spomalenie, teda kolíziu, a interpretujú ju ako podnet pre odpálenie náloží nafukovacích vakov. Podobne sa využívajú aj v malých lietacích strojoch na vyhodnocovanie kolísania na niektorú stranu a reguláciu výkonu jednotlivých pohonných jednotiek vytvárajúcich vztlak alebo úpravu geometrie príslušných lopatiek. [11]

Dnes sú v praxi využívané už len akcelerometri vyrobené technológiou MEMS, detail z mikroskopu je na obrázku 1.9. Táto technológia spočíva vo výrobe mikroskopických štruktúr, ktoré ale majú mechanické vlastnosti a je možné nimi vykonávať mechanické úkony, ale na mikroskopickej úrovni. Spravidla sú vytvárané podobnými metódami, ako aj integrované obvody vyrobené na kremíkových substrátoch, teda nanášanie masiek, exponovanie, vyvolávanie a selektívne leptanie. Majú rozmery v rozmedzí 20 μm

až jednotky mm. Výsledné motívy nakoniec vytvárajú pohyblivé štruktúry, ktoré môžu slúžiť ako senzory alebo aj miniatúrne stroje. Najbežnejšie senzory využívajú kapacitné javy, kedy sa meria zmena kapacity na kapacitnom páre hrebienkov, kde jeden z nich je fixný a druhý pohyblivý. Pohyblivá strana hrebienku sa uvádza do základnej polohy elektrostaticky a po každom nastavení sa môže začať nové meranie. Na podobnom princípe fungujú mikroskopické stroje na báze MEMS, kedy elektrostatické aktuátory môžu pumpovať kvapalinu, ako napríklad v atramentovej tlačiarňi alebo pohybovať miniatúrnymi zrkadlovými plochami v čípoch pre dataprojektory.



Obrázok 1.9 MEMS akcelerometer nasnímaný elektrónovým mikroskopom – prevzaté z [12]

V tejto práci sa bude využívať trojosí MEMS akcelerometer. Bude udávať zmenu zrýchlenia meraní lokálne a porovnávať sa záznam zmeny zrýchlenia voči tomu, čo udávajú dáta z polohovacieho zariadenia. Prípadne sa bude zmena polohy korigovať s dátami o skutočne nameranom pohybe a vyhodnocovať sa odchýlka meraní. [11]

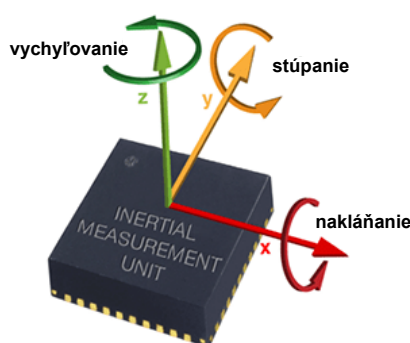
### 1.3 Gyroskop

Gyroskop je zariadenie na meranie orientácie predmetu v priestore. Na základe zvolenej základnej plochy môžeme definovať odchýlku polohy predmetu. Historické gyroskopy obsahovali rotujúce teleso, ktoré si na pohyblivých rotujúcich závesoch neustále držalo orientáciu, ktorú malo pri roztočení. Tento jav spôsobuje zákon zachovania momentu hybnosti. Gyroskopy sa primárne používajú pre navigáciu či už vo vzduchu alebo pod vodou, dnes sa ale najčastejšie vyskytujú v spotrebnej elektronike, hlavne smartfónoch, ale aj herných ovládačoch snímajúcich ich orientáciu. V týchto aplikáciách samozrejme už nefiguruje rotujúce teleso, ale celý gyroskop je vyrobený technológiou MEMS. Zároveň sa v praktických aplikáciách počíta s tým, že gyroskop disponuje

šiestimi osami voľného pohybu a teda aj snímania. Rotujúce teleso je nahradené vibrujúcim telesom, princíp zachovania momentu je však podobný. Celá MEMS štruktúra gyroskopu je podobná ako štruktúra akcelerometru, akurát spôsob funkcie a merania je odlišný. Preto sa často obidve zariadenia spájajú do jedného integrovaného obvodu. [13]

## 1.4 Jednotka merania zotrvačnosti

Dáta získané z akcelerometru a gyroskopu nemajú veľkú výpovednú hodnotu, pokiaľ sa na nich pohliada samostatne. Ich spojením je však možné snímať polohu v trojrozmernom karteziánskom priestore. Kombinácia dát z trojosého akcelerometru a trojosého gyroskopu dáva informácie o nasmerovaní a vektore síl, ktoré popisujú pohyb senzorov, vektory a rotácie sú na obrázku 1.10. Zo znalosti o smere vektoru sily je možné kresliť krivku polohy. Je taktiež možné predpokladať trasu zariadenia podľa nameraných dát. V tomto projekte budú dáta použité ako presnejšia lokálna referencia, s ktorou sa budú porovnávať pozičné dáta zo satelitov, určovať sa odchýlka a prípadne ich korigovať. [14]



Obrázok 1.10 Jednotka merania zotrvačnosti a osy, ktoré meria – prevzaté z [15]

Názov tohto zariadenia vychádza z anglického prekladu Inertial Measurement Unit, skrátené IMU. V minulosti sa tieto zariadenia využívali v leteckej technike, no vtedy boli implementované ako fyzicky veľké a zložité zariadenia citlivé na vonkajšie vplyvy. Odkedy sa ich podarilo integrovať ako kremíkové čipy technológie MEMS sú cenovo dostupné pre použitie nielen v navigačných zariadeniach, ale aj v spotrebnej elektronike. Našli veľké uplatnenie v zariadeniach, ktoré človek pri používaní drží v ruke alebo ktoré nosí na sebe. Vďaka nemu je možné sledovať polohu končatín užívateľa a interpretovať ich ako povel. [14]

## 1.5 Batériové napájanie

Keďže určovanie polohy funguje najlepšie počas priamej viditeľnosti na oblohu,

je správny predpoklad, že sa zariadenie bude najčastejšie prevádzkovať mimo elektrickej siete a je vhodné uvažovať o batériovom napájaní. Takéto riešenie zároveň prináša aj otázku doby výdrže na jedno nabitie a taktiež pridanej hmotnosti akumulátoru. Aj keď je nepravdepodobné, že by bolo nutné zariadenie pripraviť na výdrž, ktorá by atakovala hranicu dní až týždňov, je na mieste sa zamýšľať nad optimalizáciou návrhu, aby bolo možné dostať sa aspoň na jednotky hodín. To sa dá rozhodne dosiahnuť správnym výberom riadiacej jednotky, ktorá bude špecializovaná na prevádzku v rôznych režimoch spotreby. Pridaná hmotnosť akumulátoru zase závisí od druhu akumulátoru. Prakticky je Li-iontový alebo Li-polymérový akumulátor jasnou voľbou, pretože sa im žiadny iný druh akumulátoru nevyrovná energetickou hustotou, ukazuje to Tabuľka 2. [16]

Tabuľka 2 Porovnanie jednotlivých typov akumulátorov – prevzaté z [16]

Typ článku	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Pol	Kondenzátor
Min. prac. teplota [°C]	-20	0	0	-20	-40
Max. prac. teplota [°C]	55	55	60	60	65
Objemová energia [Wh/l]	104	425	495	576	5,2
Hmotnostná energia [Wh/kg]	36	110	210	250	4,6
Počet vybíjacích cyklov [-]	800	500	500	500	500000
Životnosť [roky]	5	5	2,5	2,5	10
Samovybíjanie [%/mesiac]	10	20	0,1	0,1	2,5

Zároveň dnes existuje veľký výber nielen v ich kapacitách a vonkajších rozmeroch, ale aj v obvodoch, ktoré sa starajú o správne nabíjanie, ochranu proti skratu a management vybíjania akumulátoru počas užívania. Jediným rizikom pri akumulátoroch, ktoré používajú lítium je, že ich vysoká energetická hustota môže pri ich mechanickom poškodení vyústiť k extrémnemu prehriatiu, požiaru alebo dokonca až explózii. Ostatné druhy akumulátorov, ako napríklad NiCd alebo NiMH majú nízku kapacitu k ich veľkosti, používajú nebezpečné látky a všeobecne je ich použitie už na ústupe. Alternatívou k napájaniu z akumulátoru by bolo napájanie z veľkokapacitného kondenzátoru. Jeho najväčšou výhodou je, že je prakticky neopotrebovateľným zdrojom, avšak pomerne malého množstva energie. Jeho nabíjanie



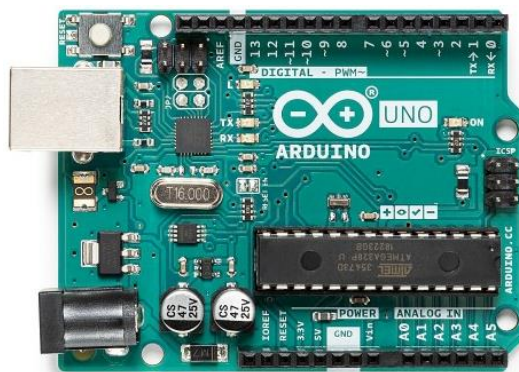
je rýchle a nevyžaduje špeciálne integrované obvody na jeho reguláciu. Funguje v širšom rozsahu teplôt ako akumulátory, ale jeho najvhodnejšie použitie je len na napájanie zariadenia v časovom rozsahu minút, počas ktorých sa presunie zariadenie od jedného sieťového rozvodu napájania k druhému. Tabuľka 2 číselne porovnáva všetky spomenuté typy sekundárnych článkov. [16]

## 1.6 Riadiaca jednotka

Riadiaca jednotka má za úlohu zbierať dáta zo všetkých senzorických zariadení, spracovávať ich a ukladať na lokálne úložisko alebo posielat' na vzdialené. Všetky tieto úlohy musí zvládať v reálnom čase a zároveň musia byť hotové v zlomkoch milisekúnd, aby sa vo zvyšnom čase mohla jednotka prepnúť do režimu šetrenia energie. V dnešnej dobe je trh plne nasýtený riadiacimi jednotkami s rôznymi vlašnosťami a nie je núdza o to vybrať si tú najvhodnejšiu pre danú aplikáciu. Je dôležité sa rozhodovať nielen na základe schopností jednotlivých integrovaných obvodov, ale aj hardvérových vývojových prostriedkov, ich ceny a dostupnosti softvérových vývojových riešení.

### 1.6.1 Arduino (Atmel AVR)

Platforma Arduino je dnes pravdepodobne najpoužívanejšia v celom obore a aj mimo neho. Vďaka nekonečnej ponuke rozširovacích modulov s predpripravenými knižnicami a riadiacimi programami, enormnej podpore zo strany komunity a neprebernému množstvu kompatibilných klonov originálnej stavebnice je Arduino, verzia Uno na obrázku 1.11, asi najjednoduchšia cesta od myšlienky k jej realizácii. [17][18][19]



Obrázok 1.11 Vývojová platforma Arduino Uno – prevzaté z [19]

Táto platforma ale bohužiaľ nikdy nebola budovaná so zreteľom na malú spotrebu energie počas prevádzky a je teda nevhodná na túto prácu. Zároveň tie najjednoduchšie mikrokontroléry z platformy Arduino nemajú dost' vysoký výkon, aby s prehľadom zvládali všetky úlohy s časovou rezervou. Nanajvýš by sa táto platforma hodila v počiatočných fázach vývoja zariadenia na overenie si funkčnosti jednotlivých komponentov a základy komunikácie s nimi po zberniciach, ktoré sú pre všetky mikrokontroléry a riadiace jednotky identické. [18]



### 1.6.2 Microchip PIC

Mikrokontroléri PIC od firmy Microchip sú už dnes klasickými integrovanými obvodmi pre jednoduché zapojenia, v ktorých hrá úlohu hlavne rýchlosť. Boli vyvinuté ešte v 70. rokoch 20. storočia ako podporné obvody pre väčšie procesory na spravovanie vstupno-výstupných portov. Keď získali nevolatilnú pamäť integrovanú priamo na kremíkovom čipe procesoru, stali sa z nich populárne mikrokontroléry pre rýchle a jednoduché operácie. Môžu mať v sebe integrované rôzne komunikačné rozhrania a sú vyrábané od najmenších puzdier so šiestimi vývodmi, príklad na obrázku 1.12, až po veľké čipy s desiatkami kontaktov. [18]



Obrázok 1.12 Najmenší mikrokontrolér od Microchip – prevzaté z [20]

Stále sú ale limitované ich rýchlosťou, ktorá by pravdepodobne nepostačovala na všetky výpočty v reálnom čase zo všetkých zdrojov dát. Hlavne v porovnaní s inými mikrokontrolérmi založenými na jadrách ARM. [17]

### 1.6.3 MSP430

Jedná sa o pomerne nový druh mikrokontroléru od firmy Texas Instruments, ktoré boli od začiatku 16-bitovými mikrokontroléry určenými na prácu s malým odberom napájania. Spočiatku sa dali kúpiť len ako samostatné integrované obvody v prevedení SOP, no dnes sú dostupné aj ako DIP čipy na vývojových kitoch s dobrou softvérovou platformou. Ich charakteristickou vlastnosťou je, že v úspornom režime majú spotrebu menšiu než jeden  $\mu\text{A}$ . Výkonové sú na podobnej úrovni ako mikrokontroléry ATmega platformy Arduino. [17]

### 1.6.4 STM32 Nucleo (ARM)

Mikrokontroléry STM32 sú dnes najvýkonnejšími mikrokontrolérmi na trhu. Každý takýto mikrokontrolér obsahuje 32-bitové procesorové jadro Cortex licencované firmou ARM Holdings. Okrem toho ho výrobca STMicroelectronics vybavuje periférnymi portami, vďaka ktorým je schopné obslúžiť širokú paletu vstupno-výstupných zariadení. Verzie tohto mikrokontroléru určené pre nízku spotrebu v režime spánku spotrebúvajú približne  $0,3 \mu\text{A}$  a zároveň sú dosť výkonné, aby čas v plnom behu, kedy prebiehajú všetky výpočty, bol dosť krátky. Procesory ARM sú dosť výkonné, aby na nich mohli fungovať operačné systémy s multitaskingom v reálnom čase. Na podobných,

ale ešte výkonnejších procesorových jadrách funguje drvivá väčšina smartfónov a podobných mobilných zariadení, ktoré sú závislé na batériovom napájaní. S integrovanými perifériami a kvalitným vývojovým softvérom sa platforma STM32 dá považovať za najpokročilejšiu skupinu mikrokontrolérov na trhu. [17][18]

### 1.6.5 Raspberry Pi

Raspberry Pi je vývojová platforma, ktorá sa viac blíži osobnému počítaču než mikrokontroléru. Každá jej verzia obsahuje USB radič, Ethernet a digitálny výstup na obrazovku. Veľkosťou sú stále podobné, ako na obrázku 1.13. [17]



Obrázok 1.13 Vývojová platforma Raspberry Pi 4 model B – prevzaté z [21]

Napriek tomu je to bežne používaná vývojová platforma, pretože obsahuje versatilnú zbernicu GPIO, ktorú je možné ovládať nielen pomocou užívateľského programu, ale aj priamo z príkazového riadku operačného systému. Platforma Raspberry Pi je najlepšia platforma pre realizovanie projektov, ktoré majú byť pripojené k internetu a dostupné zo vzdialených terminálov. Vzhľadom na to, že na tejto platforme fungujú úplne operačné systémy pre osobné počítače, majú vysokú spotrebu voči mikrokontrolérom. [17]

### 1.6.6 FPGA/CPLD

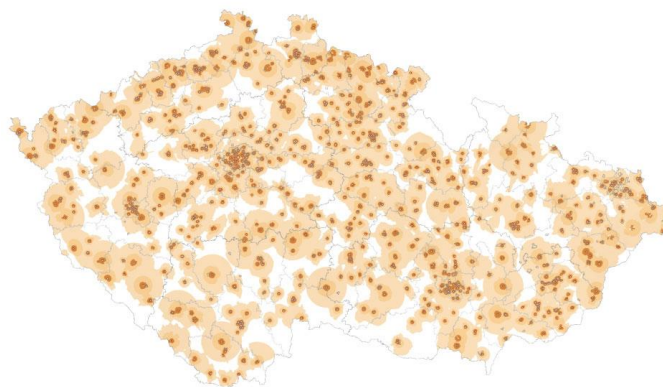
Používanie externých senzorov a iných zariadení využívajúcich sériovú komunikáciu nemusí byť nutná podmienka pre použitie mikrokontroléru s integrovaným hardvérovým portom pre dané sériové rozhranie. Je možné, že ten najlepší dizajn sa dosiahne použitím obvodu FPGA, resp. CPLD. Tieto obvody sú v rámci ich medzí nekonečne konfigurovateľné, aby vykonávali rôzne operácie, ktoré sa budú spracovávať paralelne. Vďaka tomu sú dnes obvody FPGA používané tam, kde klasická procesorová technika so sekvenčným spracovaním dát rýchlostne nestačí. V mnohých praktických aplikáciách bude spracovanie s FPGA efektívnejšie, pričom si zachováva výhody návrhu kódu pre mikrokontrolér. Konfiguráciu obvodu FPGA je možné urobiť za niekoľko sekúnd a tak testovať a odlaďovať návrh priamo na hardvéri. Nanešťastie neexistuje mnoho takýchto obvodov, ktoré by boli uspokojené na prácu v režimoch s nízkou spotrebou energie.

Aj tie najšetrnejšie obvody CPLD s nízkym počtom konfigurovateľných jednotiek sa otázke spotreby pohybujú o dva rády vyššie, než mikrokontroléry s výkonnými procesorovými jadrami a režimami šetrenia energie. Obvody FPGA a CPLD okrem toho nedokážu fungovať nevolatilne a pri cyklovaní napájania sa z nich konfigurácia stratí. Nezaobídu sa bez mikrokontroléru a pamäte flash, ktorý pripojení napájania nakonfiguruje hradlové pole. Toto by síce riešil obvod ASIC, ktorý má v sebe už od výroby konfiguráciu obvodovo zakotvenú, ale na tomto obvode už nie je možné odlaďovanie kódu alebo rutín. [22]

## 1.7 Ukladanie a odosielanie dát

Dáta, ktoré systém získa, či už priamo zo senzorov, alebo z vlastných výpočtov je nutné uložiť pre ďalšiu analýzu na lokálne úložisko a prípadne odoslať na vzdialený server, pre prípad straty dát lokálne uložených. Ako lokálne úložisko bude slúžiť pripojená SD karta, ktorá by svojou kapacitou mala plne postačovať na záznam údajov na dlhý čas.

Odosielanie dát na vzdialený server je možné vykonať niekoľkými spôsobmi. Najlacnejšie riešenie je použiť modul LoRa. Tento modul vysiela a prijíma dáta cez nízko-výkonovú rozľahlú sieť. Využíva bezplatne prístupné rádiové frekvencie, napr. 433 MHz a 868 MHz. V rozľahlých oblastiach môže mať dosah až 10 km, pričom funguje na malých vysielačích výkonoch. Môže dosahovať prenosových rýchlostí 300 bitov/s až 27 kbit/s. Také rýchlosti postačujú na odosielanie jednoduchých číselných dát na vzdialený server. Nevýhoda tejto služby je obmedzenosť pokrytia, mapa pokrytia je na obrázku 1.14. V Českej republike zabezpečujú službu České radiokomunikace sieťou svojich vysielačov. Pokryté sú väčšie sídla a ich príslušné okolie avšak v čiste rurálnych oblastiach potrebné rádiostanice nie sú. [23]



Obrázok 1.14 Mapa pokrytia ČR systémom LoRa – prevzaté z [24]

Druhou možnosťou je GSM modul so schopnosťou pripojiť sa na mobilnú dátovú sieť. Cez ňu má potom zariadenie možnosť pripojiť sa rýchlym internetovým pripojením na vzdialený server. Pokrytie 3G sieťou je v Českej republike takmer sto percentné a podobne je to celosvetovo. Celé GSM zariadenie sa predáva ako kompletný modul

s anténou a slotom na SIM kartu. Nevýhoda tohto zariadenia je, že pripojenie do mobilnej dátovej siete je spoplatnené, cena závisí od poskytovateľa služieb. Keďže ale množstvo prečerpaných dát by bolo minimálne, cena za prístup do siete by mala byť minimálna.

Podobným riešením predchádzajúcemu je použitie Wi-Fi modulu. Ten sa samozrejme do siete internet nepripojí bez lokálneho prístupového bodu. Je na mieste predpokladať, že užívateľ, ktorý bude zariadenie testovať a robiť s ním merania bude mať pri sebe smartfón, ktorý je pripojený do mobilnej dátovej siete. Preto by smartfón mohol mať nastavený v režime prístupového bodu, v ktorom sa smartfón správa ako Wi-Fi router, vytvára lokálnu sieť a dáva prístup do rozľahlej siete. Zariadenie sa raz za stanovený časový interval pripojí na prístupový bod, odošle dáta a spojenie ukončí.

## 1.8 Numerické metódy

Pre získavanie dát o rýchlosti a polohe je potrebné tieto dáta počítať z čo najpresnejšieho zdroju. Akcelerometer je veľmi presný senzor zrýchlenia vo všetkých troch osiach pohybu. Aby sa zo zrýchlenia dala spočítať rýchlosť a z rýchlosti poloha zariadenia, je potrebné použiť určité integrály. Integráciou zrýchlenia, teda spočítanie plochy pod krivkou nameranou senzorom, je možné získať rýchlosť zariadenia.

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a \, dt \quad (1.1)$$

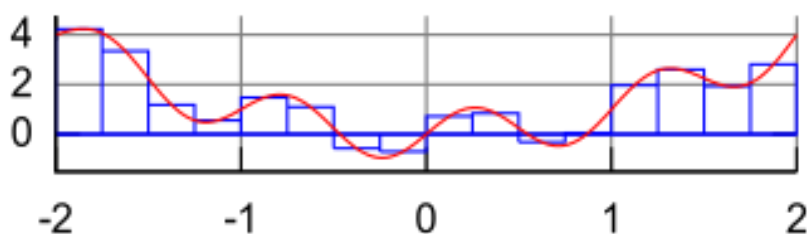
Podobne je to s rýchlosťou a polohou.

$$s(t) = s_0 + \int_0^t v \, dt \quad (1.2)$$

Dáta z akcelerometru ale nie sú definované známou funkciou, ktorá by sa dala integrovať podľa pravidiel o integrácii. Preto je nutné plochu pod krivkou definovanú prichádzajúcimi dátami spočítať istou aproximáciou. Na to slúžia numerické metódy na výpočet plochy pod ľubovoľnou krivkou. Princíp spočíva v rozdelení tejto krivky na rovnomerné úseky. Po spočítaní plôch všetkých úsekov sa plochy sčítajú a výsledkom je plocha pod celou krivkou s určitou chybou. Veľkosť chyby závisí na zvolenej metóde a veľkosti každého úseku. V prípade krivky definovanej diskretnými bodmi je najvýhodnejšie, aby mal zvolený úsek veľkosť vzdialenosti medzi jednotlivými bodmi a nie väčšiu. Potom závisí už len na zvolenej numerickej metóde. Tie používajú interpolačné funkcie, ktoré sa blížia tvaru funkcie, ale ich plocha sa počíta jednoducho. Polynómy vyšších rádov majú tendenciu k divokým kmitom a preto sa zásadne používajú len polynómy nižších rádov. [25]

Najjednoduchšou metódou je spočítať plochu pod krivkou ako obsah obdĺžnika. Táto metóda sa volá Riemannov súčet podľa svojho objaviteľa Bernharda Riemanna, ktorý ju objavil v 19. storočí. Má niekoľko modifikácií podľa toho, či sa krivky dotýka pravý alebo ľavý roh obdĺžnika. Podľa toho, či je funkcia rastúca alebo klesajúca to potom

znamená, že plocha obdĺžniku bude menšia alebo väčšia alebo plocha skutočná. Napriek tomu sa táto metóda považuje za primerane presnú, pretože ak krivka nie je na meranom úseku monotónna, tak nepresnosti sa kompenzujú. Kompromisom medzi týmito modifikáciami je stredový súčet, pri ktorom je sa bod nachádza v strede strany obdĺžnika. Príklad je na obrázku 1.15. [25]



Obrázok 1.15 Obdĺžniková metóda interpolačnej funkcie – prevzaté z [25]

Rovnicou je táto metóda vyjadrená ako

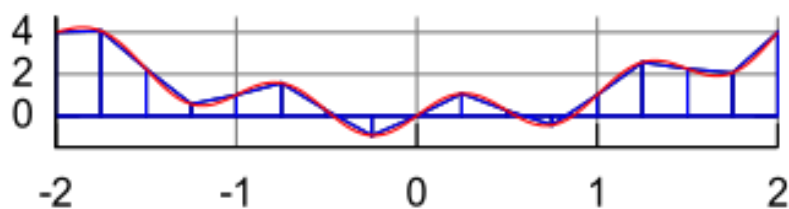
$$\int_a^b f(x)dx \approx (b-a) f\left(\frac{a+b}{2}\right) \quad (1.3)$$

a definuje súčet obsahu obdĺžnikov. [25]

Presnejšou metódou je, ak sa hodnoty funkcie aproximujú podľa hodnôt na krajoch koncových bodov. Vtedy je tvar krivky aproximovaný lineárnou funkciou. Táto metóda sa nazýva lichobežníková, pretože tvary jednotlivých plôch pripomínajú lichobežník. Táto metóda ale stráca presnosť, ak sú výkyvy medzi jednotlivými úsekmi veľmi veľké. Príklad metódy je na obrázku 1.16 a je vyjadrená ako

$$\int_a^b f(x)dx \approx (b-a) \left( \frac{f(a) + f(b)}{2} \right) \quad (1.4)$$

a definuje súčet obsahov lichobežníkov. [25]

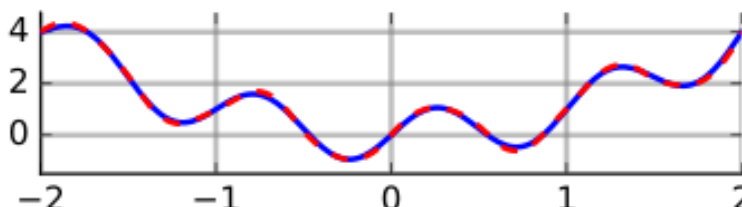


Obrázok 1.16 Lichobežníková metóda interpolačnej funkcie – prevzaté z [25]

Aby boli správne vyjadrené plynulé zakrivenia funkcie, je treba použiť funkciu druhého rádu, teda kvadratickú. Tá sa volá Simposnová metóda podľa objaviteľa Thomasa Simpsona. Vďaka rozdeleniu na drobné úseky je táto metóda veľmi presná, aj keď výpočtovo náročnejšia než predchádzajúce. Výsledok tejto metódy je na obrázku 1.17 a je vyjadrená ako

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{n} \left( \frac{f(a)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} \left( f\left(a + k \frac{b-a}{n}\right) \right) + \frac{f(b)}{2} \right) \quad (1.5)$$

kde podintervaly majú tvar  $[a + kh, a + (k + 1)h \subset \langle a, b \rangle$ ,  $h = (b - a) / n$  a  $k$  má hodnotu od 0 až po  $n-1$ . Tento súčet definuje súčet plochy tvarov, ktoré majú 3 steny priame a jednu definovanú ako časť krivky kvadratickej funkcie. [25]



Obrázok 1.17 Simpsonová metóda interpolačnej funkcie – prevzaté z [25]

Týmito počtovými metódami je možné spočítať hodnotu určitých integrálov aj strojovo s pomocou programu. Tieto dáta ale treba filtrovať, aby sa korigovali nepresnosti a zlúčili výsledky viacerých vstupov riadenom váhou medzi nimi. [25]

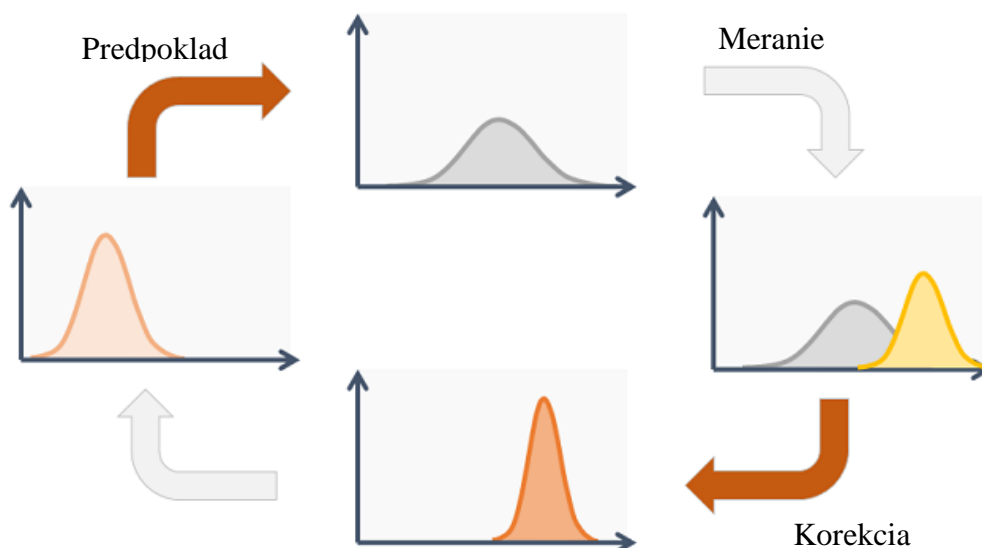
## 1.9 Numerické filtre

Všetky dáta, ktoré systém prijme obsahujú určitú dávku nepresnosti a šumu. Je potrebné, aby sa na základe známych faktov o systéme a minulých nameraných dát určil presnejší výstup zbavený nepresnosťami. K tomu slúži Kalmanov filter. Je pomenovaný podľa svojho objaviteľa, Rudolfa Kálmána a prvýkrát bol použitý pri navigácii misie Apolla. Jeho výhody sú jeho rekurzívnosť, teda že pracuje len s dátami, ktoré boli naposledy namerané a nepotrebuje počítať s celou históriou merania. To z neho robí výkonný algoritmus, ktorý ale nie je náročný na pamäť systému ani na výpočtový výkon. Podobnými algoritmami sú aj Madgwickove a Mahonyho filtračné algoritmy. Sú to nové prístupy k filtrácii a zjednocovaniu dát. Sú pomenované podľa autorov, doktor Sebastian Madgwick pôsobí v Bristole vo firme x-io Technologies Ltd. a profesor Robert Mahony pôsobí na Austrálskej národnej univerzite. Obidva tieto filtračné algoritmy sú pomerne nové a sú pripravené na integráciu 9-osých IMU senzorov. Oproti Kalmanovmu filteru ale nie sú tak univerzálne a museli by byť od základu upravené, aby mohli prijímať a spracovávať aj dáta z GNSS modulu. Tieto nové filtre používajú zložité matematické rovnice a kvaterniony, teda štvorrozmerné čísla. Sú výpočtovo náročnejšie ako Kalmanov filter a dosahujú rovnakých alebo marginálne lepších výsledkov. Preto sa pri zlučovaní viacerých dátových vstupov odporúča používať Kalmanov filter ako najuniverzálnejšie riešenie s výbornou výpočtovou rýchlosťou. [26][32][33]

Princíp Kalmanovho spočíva v ználosti fyzikálnych modelov, podľa ktorých sa riadia prichádzajúce dáta. Zvyčajne sa Kalmanov filter používa na stanovenie pohybu telesa v priestore a teda fyzikálnym modelom je kinematika. Tie sa zaoberajú

dráhou  $s$  a časom  $t$ , vďaka ktorému je možné spočítať rýchlosť  $v$ , vďaka ktorej je možné vypočítať zrýchlenie  $a$ . V praxi sa používajú ale zložitejšie numerické metódy ako integrály a derivácie. [26][34]

Na základe tohto modelu sa vytvorí predpoklad, akých hodnôt dosiahnu premenné v nasledujúcom kroku a k nim sa spočítajú aj ich neurčitosti. Neurčitosťami môžu byť chyby merania, šum, ale aj nepredvídateľné externé vplyvy. Po akvizícii nových dát sa odhad upraví podľa nameraných dát, pričom váha medzi odhadom a meraním závisí od vopred známej nepresnosti a chyby meraných dát. Tieto dáta sú vstupom pre nový výpočet odhadu a systém takto pracuje dookola ako je na obrázku 1.18, pričom koriguje chyby, ktoré by boli mimo rámec známych skutočností. Vďaka tomuto je možné kombinovať dáta o absolútnej polohe z GNSS senzoru, ktorý má ale nepresnosť niekoľko desiatok až stoviek cm s dátami o zrýchlení a polohe v priestore, ktoré majú vysokú presnosť, ale ich dáta sú len relatívne. Samozrejme, že tieto výpočty sú zložitejšie vďaka tomu, že sa pohyb deje v trojrozmernom priestore a odhady musia byť vypočítané pre všetky tri osy pohybu. [28][29]



Obrázok 1.18 Schematické znázornenie Kalmanovho filtru – prevzaté z [34]

Spomínané nepresnosti vychádzajú z nepresností, ktoré definuje výrobca senzorov, či už sú to akcelerometre alebo gyroskopy, prípadne systémové akými sú nepresnosti určovania polohy satelitmi. Je potrebné ešte dodať, že Kalmanov filter dokáže korigovať dáta len pre lineárne systémy. Pri použití v iných aplikáciách je potrebné ale tento fakt zvážiť a prípadne použiť rozšírený Kalmanov filter. [27][28][31]



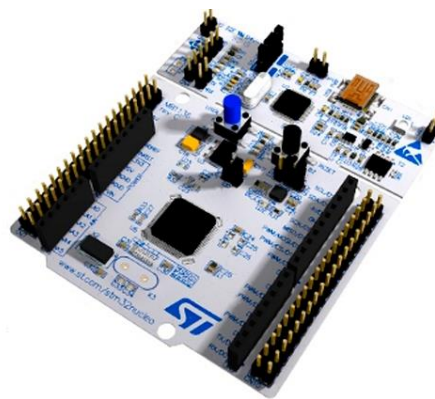
## 2. NÁVRH KONŠTRUOVANÉHO ZARIADENIA

Táto kapitola rozoberie konkrétne plánované riešenie zariadenia, vyberú sa použité moduly a navrhne topologická koncepcia zariadenia. Predchádzajúca kapitola popísala teóriu jednotlivých technológií a možnosti, ktoré sa na dnešnom trhu nájdu. Správny návrh musí počítať s tým, že nie každý komponent môže správne fungovať s iným. Vzájomná kompatibilita je kľúčová pri vytvorení efektívneho dizajnu.

### 2.1 Vývojový kit

Pre prvotné kroky pri vývoji je vhodné namiesto samostatného integrovaného obvodu použiť vývojový kit, ktorý má všetky dostupné signály vyvedené na zbernici, ku ktorým sa ľahko pripájajú ďalšie periférie a zároveň obsahujú vstavané programátory, ktoré sa pripájajú cez rozhranie USB priamo do osobného počítača. Z rešerše z predchádzajúcej kapitoly najlepšie vychádza vývojový kit na základe mikrokontroléru STM32 od firmy STMicroelectronics. Je to platforma, ktorú ponúka vysoký výkon, veľmi nízku spotrebu a prepracované vývojové nástroje. Vďaka týmto nástrojom sú softvérové návrhy portovateľné medzi jednotlivými čipmi tejto platformy. Je teda otázne, ktorú verziu vývojovej platformy Nucleo, príklad na obrázku 2.1, ako ju nazýva výrobca, si vybrať. Výber je v niekoľkých kategóriách, pričom najzásadnejším parametrom počet pinov integrovaného obvodu, veľkosť integrovanej pamäte flash a zameranie obvodu. Celá produktová rada je na obrázku 2.2. [35]

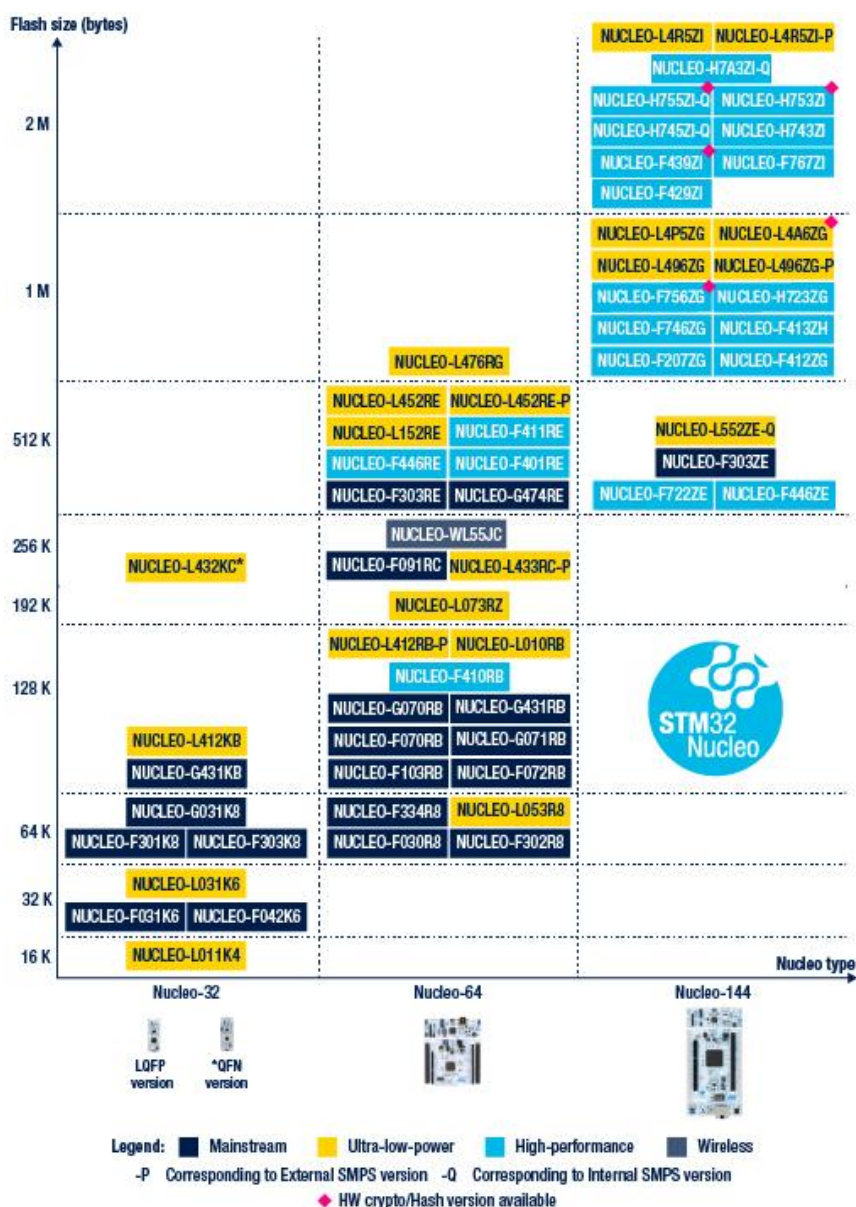
V rámci zameranie obvodu sa môžu vylúčiť všetky, ktoré nie sú určené na aplikácie s nízkou spotrebou, teda všetky okrem žltých na obrázku. Počet vstupno-výstupných pinov určuje flexibilitu celého obvodu a mikrokontrolér s celkovým počtom 64 pinov by mal postačovať, to sú všetky v strednej sekcii grafu. Nakoniec, čím väčšie množstvo flash pamäte, tým jednoduchší je vývoj, počas ktorého nie je obmedzená zložitosť obslužného programu. Po vyjasnení si týchto priorít vyjde ako najlepší vývojový kit NUCLEO-L476RG, ktorý obsahuje integrovaný obvod STM32L476RG. [36][37]



Obrázok 2.1 Vývojový kit NUCLEO-L476RG – prevzaté z [36]



Tento mikrokontrolér obsahuje procesorové jadro ARM Cortex-M4 pracujúce s taktom až 80 MHz. Mikrokontrolér obsahuje prepracované režimy operácie s nízkymi odbermi, pričom najúspornejší spotrebováva len 30 nA. Väčšina jeho vstupno-výstupných portov je tolerantná až na 5 V logické úrovne. Obsahuje až 1 MB vstavanej flash pamäte a až 128 kB SRAM s možnosťou rozšírenia. Disponuje niekoľkými 12 bitovými AD a DA prevodníkmi, operačnými zosilňovačmi a komparátormi. Je schopný natívne komunikovať väčšinou populárnych sériových protokolov. [37]



Obrázok 2.2 Produktová línia vývojových kitov Nucleo – prevzaté z [35]

Na softvérový vývoj pre tento mikrokontrolér je možné použiť niekoľko vývojových prostredí. Výrobca poskytuje k svojej vývojovej platforme aj nástroj na vývoj softvéru, ktorý sa volá STM32 CubeIDE. Alternatívou je vývojový prostriedok MDK-ARM

od firmy ARM-KEIL. Obidve alternatívy sú spoplatnené pre komerčné využitie a zadarmo pre akademické využitie s podmienkou prihlásenia sa do služby výrobcu.

## 2.2 GNSS modul

Na trhu s navigačnými integrovanými modulmi existujú dvaja najväčší výrobcovia, u-blox a Quectel. Obidvaja ponúkajú porovnateľné výrobky z hľadiska technických parametrov. Podporujú všetky alebo väčšinu polohovacích systémov, ako sú GPS/QZSS, GLONASS, Galileo, BeiDou a niektoré podporujú aj NavIC. Ponuka vhodných obvodov od jednotlivých výrobcov sa za predpokladu, že by mali podporovať čo najväčšie množstvo lokalizačných služieb, zmenší na 2 výrobky od každého. Cenovo sú všetky integrované obvody porovnateľné. Ich vzájomné parametre porovnáva Tabuľka 3.

Tabuľka 3 Porovnanie vybraných GNSS modulov [38][39][41][42]

Výrobca	Model	NavIC	Súčasný príjem	Vstavaná anténa?	Citlivosť [dBm]	Spotreba pri lokalizácii [mA]
u-blox	M8	Nie	3	Nie	-167	23
u-blox	M9	Nie	4	Nie (SAW+RNA)	-167	36
Quectel	L96	Nie	3	Áno	-165	20
Quectel	L89	Áno	2	Áno (2)	-163	95

Podrobnejší rozbor dát jednotlivých modulov ukazuje, že najvýhodnejší pre túto prácu by bol modul Quectel L96, ktorý je na obrázku 2.3.



Obrázok 2.3 GNSS modul Quectel L96 – prevzaté z [42]

Dôvodov je niekoľko. Model Quectel L89 síce dokáže prijímať dáta z indickej satelitnej siete, ale v súčasnej dobe u nás táto služba nemá pokrytie. Zároveň obsahuje dve vstavané antény, ale podporuje príjem len zo služieb NavIC a ostatných polohovacích

systémov, pričom má pomerne zlú citlivosť. Najväčším nedostatkom tohto integrovaného obvodu je ale spotreba v plnej prevádzke, ktorá je v porovnaní s konkurenciou excesívna. Obvody od u-blox ponúkajú veľmi dobrú citlivosť a ich spotreba v plnej prevádzke je prijateľná. Model u-blox M9 dokonca podporuje súčasný príjem až na 4 polohovacích službách, čo sú zároveň všetky, na ktoré je usposobené. Chýbajúca vstavaná anténa je však komplikácia, ktorá sa prejaví pri vývoji a testovaní. Vstavaná anténa dáva určitú garanciu toho, že zariadenie bude správne fungovať hneď po prvom pripojení. U modelu u-blox M8 je celý problém umocnený tým, že nemá ani vstavaný nízkošumový zosilňovač a filter, tie musí dodať užívateľ. Model M9 tieto komponenty obsahuje a malo by byť možné pripojiť GNSS anténu priamo k integrovaného obvodu. Napriek tomu sa ako najvhodnejší zdá byť integrovaný obvod Quectel L96. Je schopný prijímať dáta zo všetkých druhov satelitov, ktoré sú na našom území relevantné a naraz prijímať až z 3 rôznych služieb. Má prijateľnú citlivosť a suverénne najnižšiu spotrebu v plnej prevádzke. [38][39][41][42]

## 2.3 Ďalšie komponenty

Ďalšími komponentmi, ktoré dotvoria celé zariadenie sú akcelerometer a gyroskop. Trh s týmito zariadeniami bol pri prvotnom výbere bohatý a dobre zásobený. Zároveň majú výrobky od rôznych výrobcov porovnateľné vlastnosti. Pokiaľ budú senzory schopné komunikovať protokolmi, ktoré mikrokontrolér podporuje, čo je väčšina, tak všetky také senzory sú vhodné pre tento projekt. 9-osé IMU, model BMX160 od firmy Bosch na obrázku 2.4, bolo vybrané na základe dostupnosti u veľkého predajcu Mouser. [43]



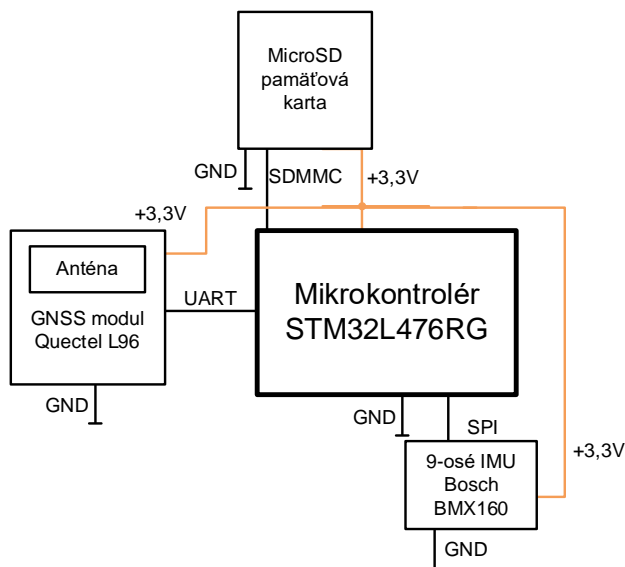
Obrázok 2.4 9-osé IMU Bosch BMX160 – prevzaté z [40]

Disponuje akcelerometrom, gyroskopom a magnetometrom s až 16-bitovým rozlíšením. Tento čip dokáže komunikovať po zbernici I<sup>2</sup>C aj SPI a teda je kompatibilný s vybraným mikrokontrolérom. Tento senzor je dnes to najlepšie, čo je dnes na trhu dostupné za rozumnú cenu okolo 100 Kč za kus. Podobnými vlastnosťami disponuje

aj produkt MPU-9250 od firmy InvenSense, ale dostupnosť tohto produktu je už obmedzená a u väčšiny predajcov je vedený ako zastaraný model. [44]

## 2.4 Topológia zariadenia

Na obrázku 2.5 je navrhovaná topológia zariadenia spolu s druhom komunikácie, cez ktorú budú medzi sebou posielat' dáta a napájania. Všetky plánované komponenty používajú napájacie napätie +3,3 V, ktoré je ale možné získať z vývojovej dosky Nucleo, ktoré má vstavaný regulátor napätia. Väčšina periférii je schopná komunikovať po obojsmerných sériových zberniciach I<sup>2</sup>C aj UART. UART komunikácia dokáže spájať len 2 zariadenia medzi sebou, zatiaľ čo I<sup>2</sup>C umožňuje, aby jedno zariadenie určovalo viacerým ostatným podradeným zariadeniam, kedy môžu na zbernici komunikovať. Izolovanie jednotlivých zariadení na rôznych zberniciach môže byť výhodne pri oživovaní dosky, pretože by sa zariadenia tak medzi sebou nemalo ovplyvňovať. Konkrétne riešenie, akou zbernicou sa bude pripájať ktoré konkrétne zariadenie padne až keď budú známe konkrétne druhy použitých zariadení a tiež ako môžu využiť možnosti mikrokontroléru. Namiesto diskretných obvodov akcelerometru a gyroskopu sa použilo spomínané IMU, ktoré zjednocuje tieto zariadenia do jedného čipu.



Obrázok 2.5 Topologický návrh zariadenia

Pri každom zariadení bude taktiež záležať na kľudovej spotrebe. Po spočítaní priemernej spotreby energie za časovú jednotku sa určí, aký kapacitne veľký akumulátor bude potrebný pre dosiahnutie rozumnej výdrže.

## 2.5 Cieľové parametre zariadenia

Na konci rozboru technológie je dobré stanoviť ciele, ktoré by toto výsledné zariadenie malo mať. Parametre potom môžu byť porovnávané s konkurenčnými zariadeniami. Tieto parametre obsahuje Tabuľka 4. Tieto parametre sú minimálne, ktoré by malo zariadenie splňovať. Vychádzajú z parametrov integrovaných obvodov, ktoré boli navrhnuté v teoretickej časti a taktiež z vlastností, ktoré by malo zariadenie splňovať, teda výdrž akumulátoru, kapacita záznamu a celková cena. Cena zariadenia zahrňuje cenu komponentov a DPS pre základnú funkciu. Výroba zložitejšieho zariadenia, ktoré by zahrňovalo vlastný akumulátor a obal zariadenia by bolo pravdepodobne drahšie.

Tabuľka 4 Výpis základných požadovaných parametrov zariadenia [45][43][47]

GNSS kompatibilita	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Citlivosť akvizícia/trasovanie	-148 dB / -165 dB
Presnosť polohovania GNSS	< 2,5 m
Frekvencia snímání polohy GNSS	1 Hz
Citlivosť akcelerometru	až 0,000599 m/s <sup>2</sup> (v rozsahu ± 2 g)
Citlivosť gyroskopu	až 0,00381° (v rozsahu 125 °/s)
Citlivosť magnetometru	0,3 μT
Výdrž akumulátoru	až týždeň (podľa kapacity akumulátoru)
Kapacita záznamu	½ roka záznamu na 2GB pam. kartu
Cena	< 1000 Kč

Zo zadania ale vychádza, že zariadenie by malo slúžiť skôr na experimentálne účely a preto by malo byť ťažiskom zariadenia rozšíriteľnosť a jednoduchosť testovania a hľadania chýb a problémov. Všetky tieto vlastnosti skôr ukazujú na nejaký druh dosky, ktorá by sa pripájala na univerzálnu zbernicu prototypovacej platformy, ktorá ponúka vývojové prostredie a jednoduchosť diagnostiky.

### 3. VLASTNÉ RIEŠENIE PROBLÉMU

Ako bolo naznačené v predchádzajúcej časti, základné komponenty na stavbu popisovaného zariadenia sú vybrané. Tieto komponenty je nutné vhodne prepojiť, aby nepodliehali vzájomnému rušeniu a boli mechanicky odolne zapojené pre bezstarostnú manipuláciu. Je mnoho možností, ako tento výrobok pojať. Od plne samostatného zariadenia s vlastným managementom napájania, integrovanou riadiacou jednotkou a vonkajším obalom až po otvorenú vývojovú platformu s možnosťou pripojenia na veľké množstvo riadiacich členov. Keďže bola ako vývojová platforma vybraný kit Nucleo a zadanie naznačuje, že zariadenia by malo slúžiť hlavne na testovacie účely, zariadenia bude pojaté ako tzv. shield, teda prídavná rozširujúca doska, ktorá sa pripája na univerzálne konektory vstavané na kit Nucleo. Vďaka tomu bude v budúcnosti možné toto zariadenie pripojiť k veľkému množstvu riadiacich členov, ktoré disponujú rovnakými konektormi.

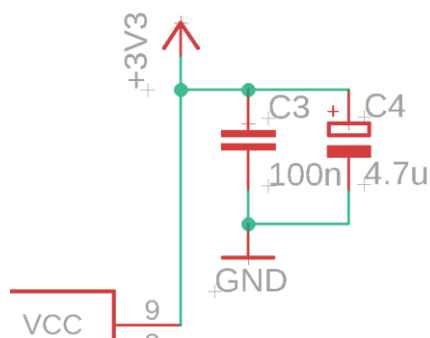
#### 3.1 Obvodový návrh

Schematická časť návrhu spolu s neskorším fyzickým návrhom DPS bola realizovaná v návrhovom prostredí AutoDesk EAGLE. Je to štandard v elektrotechnickom obore, je dobre podporovaný komunitou aj výrobcami DPS a existuje preň veľa dostupných knižníc súčiastok. Taktiež je pre študentov v rámci školy dostupný zdarma v licencií pre študentov.

Pri obvodovom návrhu bolo nutné zvážiť, ktoré komponenty sú potrebné pre funkciu zariadenia. Výrobca každého komponentu dodáva katalógový list, v ktorom popisuje, ako má byť jeho zariadenie pripojené do obvodu a aké prídavné zariadenia potrebuje na správnu funkciu. Je taktiež vhodné zvažovať, aké komponenty môžu byť nápomocné pri následnom používaní zariadenia, napr. indikačné LED diódy alebo tlačidlá.

Vďaka tomu, že Nucleo je napájané z dátovej zbernice USB a má vlastný menič na 3,3 V, odpadá potreba riešiť napájanie, jeho stabilitu, management akumulátoru a výdrž na jedno nabitie. Pri praktických pokusoch bude celé zariadenie napájané z externej Li-ionového akumulátoru s 5 V výstupom. Ten má dostatočnú kapacitu, aby dokázal nabíjať smartfón, má preto určite dostatočnú kapacitu, aby napájal toto zariadenie na dostatočne dlhú dobu, aby bol vykonaný test. V prípade testovania v motorovom vozidle je taktiež možnosť pripojiť zariadenia na lokálny menič z 12 V na 5 V. Napájacie obvody na doske Nucleo by mali byť schopné spracovať aj takéto napájanie na dostatočne stabilné napájacie napätie. Aby bola zaistená stabilita napätia aj pre procesy citlivé na výkyvy, má Nucleo dokonca napájanie 3,3 V zvlášť určené na komunikačné porty, ktoré by malo byť elektricky oddelené od všeobecného napájania a poskytovať veľmi stabilný zdroj pre sériovú komunikáciu.[47][48]

Každý integrovaný obvod potrebuje na svoje napájacie piny kondenzátory, ktoré kompenzujú výkyvy v napájacom napätí spôsobené neustálou zmenou záťaže od ostatných integrovaných obvodov. Preto je použitý malý keramický kondenzátor s kapacitou 100 nF, ktorý dokáže vyrovnávať malé a rýchle zmeny napätia. Paralelne s ním je pripojený tantalový kondenzátor s kapacitou 4,7 µF. Ten zase pokrýva väčšie rušenia nižších frekvencií. Schematický návrh je na obrázku 3.1. Táto praktika bola uplatnená pri všetkých integrovaných obvodoch, vrátane slotu na MicroSD kartu, aby aj pamäťová karta mala prístup k stabilnému napájaniu. Okrem toho boli odrušovacie kondenzátory použité aj pre všeobecnú filtráciu napájacích vetví, komunikačnej aj všeobecného rozvodu. [47][48]



Obrázok 3.1 Detail schémy filtrácie napájacieho napätia

Zapojenie IMU je analogické s ostatnými integrovanými obvodmi. Jeho komunikačné piny boli zapojené ako rozhranie SPI podľa pokynov výrobcu z katalógového listu. Obvod disponuje dvoma signálmi prerušenia, ktorých funkciu je možné softvérovo nastaviť. Tie sú pripojené na voľné vstupno-výstupné piny na mikrokontrolére. Napájanie je filtrované podobne ako u ostatných obvodov dvojicou kondenzátorov s hodnotou 100 nF a 4.7 µF, ako je vidieť na obrázku 3.2. [43]

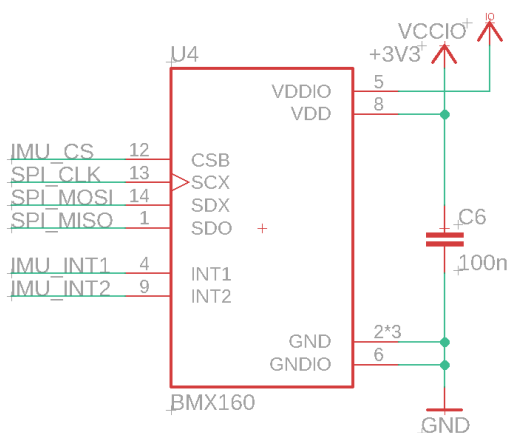
Pre uľahčenie sledovania stavov zariadenia a základného ovládania boli pridané indikačné LED diódy a tlačidlo, schéma je na obrázku 3.3. Hodnota odporu limitujúci prúd tečúci do LED diódy bol spočítaný na základe úbytku napätie na priemernej LED dióde vyžarujúcej zelené svetlo a maximálneho prúdu, ktorý je možno čerpať z výstupného tranzistoru GPIO pinu Nuclea. Prúd z GPIO pinu by mal byť menší než 20 mA, z bezpečnostných dôvodov bol prúd stanovený na približne 10 mA. Pri takomto prúde je úbytok napätie 2 V. V takom prípade sa odpor spočíta podľa Ohmovho zákona a zaokrúhli sa na odpor z rady E12 takto

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{1,3}{0,01} = 130 \, \Omega \Rightarrow 150 \, \Omega \quad (3.1)$$

kde R je odpor,  $U_R$  je napätie na odpore a I je prúd. [48]

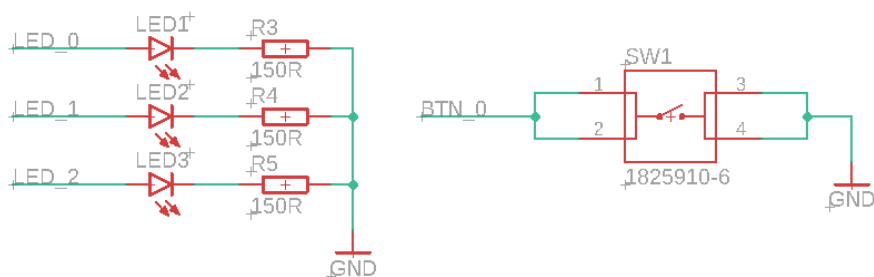
LED diódy budú signalizovať stav jednotlivých súčastí lokácie polohy, aktivitu na sériovej linke UART medzi GNSS modulom a mikrokontrolérom, aktivitu na sériovej linke SPI medzi IMU čipom a mikrokontrolérom a aktivitu medzi mikrokontrolérom

a MicroSD kartou. Tlačidlo bude slúžiť na zastavenie záznamu, ktorý sa začne automaticky po prijatí validných dát.



Obrázok 3.2 Zapojenie 9-osého IMU BMX160

Započatie nového záznamu sa bude vykonávať reštartovaním mikrokontroléru, ktorý má na toto zabudované tlačidlo.



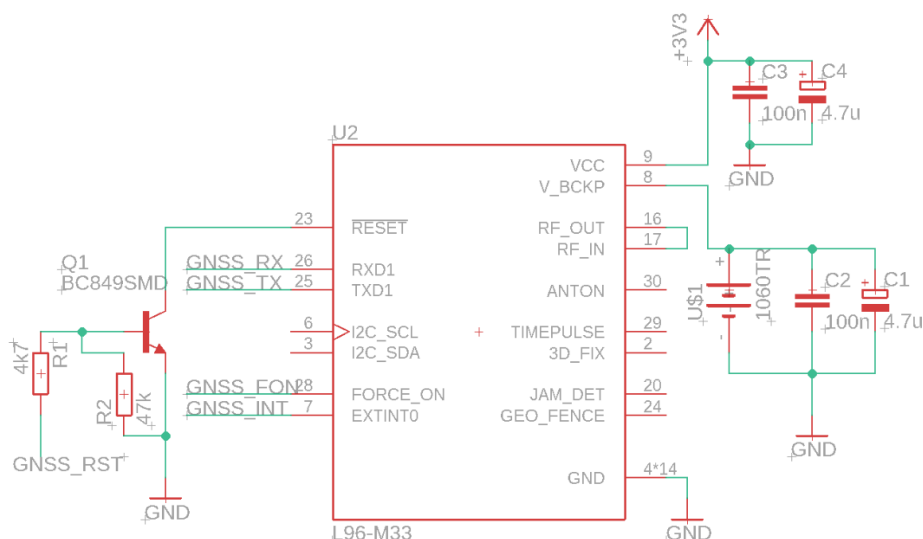
Obrázok 3.3 Použité signalizačné a ovládacie prvky a ich zapojenie

Zapojenie GNSS lokalizačného modulu je presne popísané v katalógovom liste a podľa neho je vytvorené zapojenie z obrázku 3.4. Vyžaduje si, aby okrem napájania s filtračnými kondenzátormi mal modul aj záložné napájanie malou batériou na uchovanie základných nastavení pre rýchle naštartovanie lokalizácie. Ďalej je potrebné, aby sa signál RESET spúšťal cez tranzistor, zapojenie si výrobca zadal sám. K tomuto modulu je možné pripojiť aj externú anténu a ovládať externé zosilňovače a filtre pre anténu. Tento návrh ale využíva len vstavanú anténu modulu a preto sa signálový vstup a výstup skratujú a riadiace piny nechajú nepripojené. Ďalej má modul vyvedené aj piny pre špeciálne funkcie, ktoré slúžia ako indikácia zvláštnych udalostí, z ktorých sa musí väčšina dopredu aktivovať. V tomto projekte ale nebudú potrebné a preto podľa pokynu výrobcu ostali nepripojené. [45]

Modul GNSS Quectel L96 a ani väčšina použitých komponentov nie je zahrnutá vo vstavaných knižniciach návrhového prostredia EAGLE. Nebolo ale zložité ich dohľadať online. Pri všeobecnejších komponentoch, akými sú držiak na gombíkovú batériu alebo slot na MicroSD kartu bolo nutné vybrať taký model výrobku, ktorý

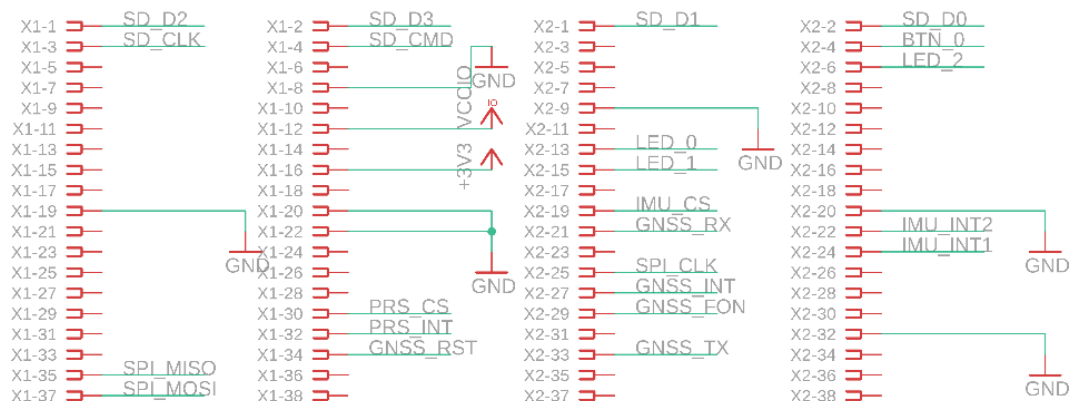


je nielen dostupný u bežných predajcov so súčiastkami, ale k nim existuje aj dostupná knižnica pre návrhové prostredie EAGLE.[45]



Obrázok 3.4 Zapojenie modulu GNSS vrátane komunikácie, riadenia a napájania

Aj keď tvorba vlastných knižníc je vždy možná cesta, pri tvorbe môžu vzniknúť chyby, ktoré sú pri knižniciach vytvorenými a používanými komunitou odhalené. Najväčším komponentom, ktorý sa nakoniec ale do finálneho návrhu nedostal bol model vývojovej dosky Nucleo. Ten bol použitý na neskoršie rozvrhnutie komponentov na doske, vytýčenie rozmerov dosky a určenie fyzickej polohy dôležitých pinov na doske. Po uzavretí návrhu bol ale tento model nahradený dutinkovými lištami, ktoré sú na obrázku 3.5, s rovnakou roztečou a počtom kontaktov, aby sedeli na vývojovej doske ako protikus a tak vytvorili spomínaný shield. [47]



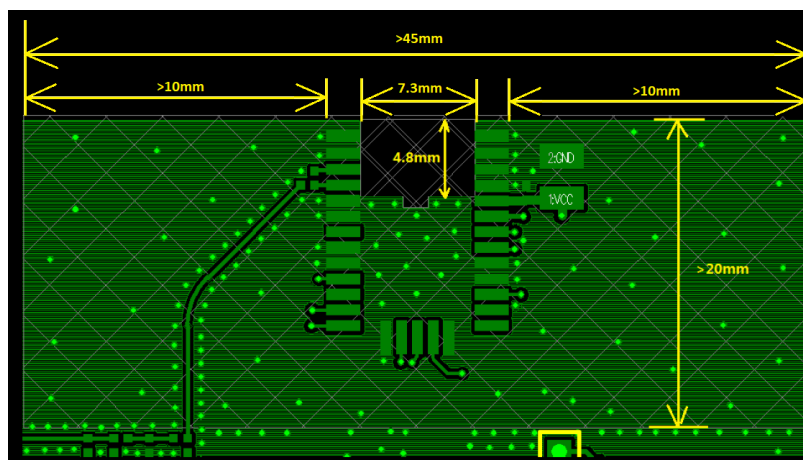
Obrázok 3.5 Rozloženie komunikačných periférií na konektory zbernice Nucleo

Okrem spomínaného integrovaného obvodu IMU Bosch BMX160 bol do návrhu pridaný aj integrovaný obvod BMP388 od rovnakého výrobcu. Je to senzor barometrického tlaku, na jeho základe je možné merať nadmorskú výšku. Obidva obvody

spoločne zdieľajú pripojenie na zbernicu SPI, zvlášť majú pripojené signály pre výber konkrétneho adresáta SPI komunikácie. Okrem toho každý disponuje niekoľkými signálmi prerušenia a tieto boli taktiež pripojené k mikrokontroléru pre budúce použitie. Obvod na meranie barometrického tlaku bol pridaný z dôvodu možného teoretického rozšírenia možností tejto vývojovej platformy. V teoretickej časti tohto textu ale jeho funkcia nie je rozobraná a pre účely tejto práce nebol využitý. Preto už ďalej nebude zmieňovaný. Celá schéma návrhu obsahuje Príloha B -Schéma zariadenia.

### 3.2 Návrh DPS

Pri návrhu DPS boli základné parametre vopred dané, ako ukazuje výrez z dokumentácie na obrázku 3.6. Doska plošných spojov musela mať minimálne rozmery dosť veľké na to, aby dutinkové lišty mali správnu pozíciu a mohli sa priamo pripojiť do konektorov periférie na vývojovej doske Nucleo. Ďalšou podmienkou sú požiadavky výrobcu GNSS modulu na jeho umiestnenie a okolité prvky na DPS. Aby anténa na tomto module fungovala čo najlepšie a nebola rušená priamym okolím, je potrebné, aby v okolí modulu neboli žiadne iné komponenty, pasívne alebo aktívne. V okolí modulu musí byť neporušená plošná zem, okrem malej časti, ktorá sa nachádza priamo pod anténou. Žiadne komponenty by sa nemali nachádzať ani druhej strane DPS. [45]

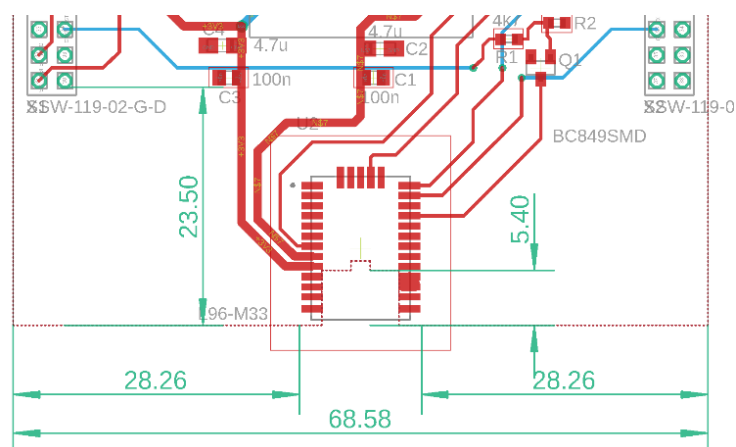


Obrázok 3.6 Podmienky pre umiestnenie a okolie modulu Quectel L96 na DPS podľa výrobcu – prevzaté z [45]

Všetky tieto podmienky boli zachované, ako je vidieť na obrázku 3.7. Najkratší z meraných rozmerov je dlhší, než je v katalógovom liste výrobcu. Toto ale nemá vplyv na výkonnosť antény, je to len dôsledok toho, že GNSS modul nie je osadený tak blízko ku hrane DPS, ako predpokladal výrobca. Aby náhodou nedošlo k rušeniu z vývojovej dosky, je tvar shieldu navrhnutý tak, aby GNSS modul prevísal cez okraj vývojovej dosky. Takto by sa malo dosiahnuť optimálnej úrovne signálu. [45]

Ostatné komponenty boli následne rozložené do zbytkového voľného priestoru. Ich približné umiestnenie bolo definované okrem logického usporiadania

aj dostupnosťou vhodných portov na vývojovej doske. Nie všetky piny na tejto ani inej vývojovej platforme dokážu vykonávať všetky funkcie, ktorými disponuje mikrokontrolér.



Obrázok 3.7 Umiestnenie GNSS modulu na návrhu DPS

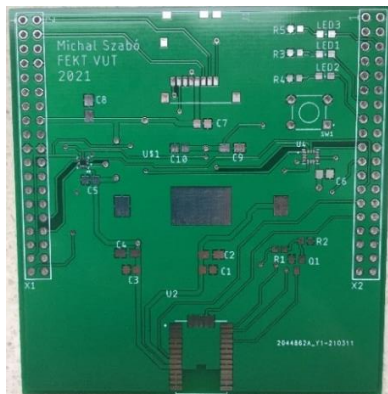
Bolo nutné zadefinovať porty ich funkciám, či už sériovej komunikácii, obsluhu MicroSD karty ale všeobecným vstupno-výstupným portom. Toto zabezpečuje vývojové prostredie CubeMX od výrobcu vývojovej dosky STMicroelectronics, o ktorom sa bude písať v ďalšej kapitole. Vďaka tomu sa určilo, že slot na MicroSD kartu musí byť na opačnej hrane DPS, pretože piny, ktoré ho obsluhujú sú umiestnené len tam. Pri tom však vzniká riziko, že pri neopatrnnej manipulácii so shieldom by mohlo dôjsť k neúmyselnému vysunutiu pripojenej MicroSD karty a zmareniu záznamu dát. V horšom prípade ku strate všetkých údajov alebo nenávratnému poškodeniu MicroSD karty. Z toho dôvodu sa slot umiestnil tak, že sa pamäťová karta vysúva smerom do stredu DPS a je teda oveľa menej pravdepodobné, že by sa mohla vysunúť neúmyselne. Držiak na batériu, umiestnený medzi MicroSD slot a GNSS modul, taktiež komplikuje vysnutie pamäťovej karty, pokiaľ je v ňom umiestnená gombíková batéria. Vďaka tomu je tiež znemožnené jednoduché vysunutie pamäťovej karty bez toho, aby si užívateľ overil, že zariadenie je vypnuté a je možné pamäťové médium bezpečne odpojiť. [47][48]

Ostatné komponenty využili voľný priestor. Dva integrované obvody boli umiestnené ekvidistantne rovnako vzdialené od batériového držiaku, pretože zdieľajú rovnakú zbernicu a ich prepojenie by malo byť čo najkratšie. LED diódy a tlačidlo využili voľný priestor napravo od slotu na MicroSD karty, ideálne pre užívateľa s dominantnou pravou rukou. Priestoru na druhej strane zase dominuje popis zariadenia a podpis autora.

### 3.3 Výroba, osadenie, overenie funkčnosti

Výroba DPS bola zabezpečená čínskym výrobcom JLCPCB, fotografia je na obrázku 3.8. V obore sú známi ako rýchly a flexibilný výrobca kvalitných dosiek plošných spojov, ktorý v rámci svojich promotion akcií ponúkajú ceny, ktorým nemôžu konkurovať

ani lokálny výrobcovia. Pokiaľ zákazníkovi stačia základné materiály, teda doska FR-4, dve vrstvy medi, zelená farba nepájivej masky ošetrovanie povrchu spájkovacích plôch ponorením do roztavennej spájky a ofuk vzduchom, je cena za 5 kusov dosiek 2 americké doláre s dopravou zdarma. V cene je zahrnutý aj prevod gerber súborov na ich vlastný panel a elektrický test. Na ich webových stránkach ponúkajú aj šablóny, podľa ktorých si zákazník môže vytvoriť gerber súbory vo formáte vhodnom pre výrobcu. Doba medzinárodnej dopravy je garantovaná na 2 až 3 dni a po pripočítaní doby výroby nakoniec dorazila do 5 dní. To je rýchlejšie, než by trvalo lokálnemu výrobcovi.



Obrázok 3.8 DPS od výrobcu JLCPCB

Nákup komponentov nebol jednoduchý, pretože nebol nájdený predajca, ktorý by mal naskladnené všetky potrebné komponenty. Kľúčová súčiastka, GNSS modul, nebola dostupná u veľkých nadnárodných predajcov ako Farnell alebo Mouser. Nakoniec sa ale prekvapivo našiel u paneurópskeho predajcu SOS Electronic. Ten ale nanešťastie nepredával potrebné senzorické integrované obvody a ani ďalšie komponenty, pre ktoré by boli dostupné knižnice do EAGLE.

Senzory boli dostupné len u jedného predajcu a museli byť objednané od amerického Mouseru a dopravené až z ďalekého Texasu. Bohužiaľ ekologickejší variant nákupu nebol možný. Držiak na batériu a slot na MicroSD kartu boli objednané o ďalšieho pseudo-lokálneho predajcu, TME Electronic Components. Samotná gombíková batéria a MicroSD karta boli kúpené u lokálneho predajcu elektroniky. V rámci kompatibility bola zakúpená MicroSD karta s kapacitou 2 GB so základným SD štandardom. Vyššie kapacity už používajú rozšírené štandardy SDHC alebo SDXC. Vyššia pamäťová kapacita nie je potrebná pre uchovávanie textových dát a zároveň je zaručená kompatibilita medzi pamäťovou kartou a driverom mikrokontroléru. Drobné komponenty ako odpory, kondenzátory LED diódy, tlačidlo a tranzistor boli poskytnuté zo zásob vedúceho diplomovej práce.

Z dôvodu malých rozmerov komponentu a použitie bezvývodových komponentov bolo potrebné osadiť dosku na profesionálnej spájkovacej stanici, ktorá disponuje mikrospájkovačkou s precíznym hrotom a dobrým riadením teploty hrotu a teplovzdušnou tryskou pre spájkovanie čipov, ktoré sa nedajú spájkovať rozohriatym

hrotom. Takáto stanica od firmy JBC sa nachádza na pracovisku vedúceho diplomovej práce, ktorý k nej umožnil prístup. Bol zvolený klasický postup pri osadzovaní, teda od najmenších komponentov po najväčšie. Dôvod je, že väčšie komponenty by mohli zavadzať pri manipulácii s rozohriatym nástrojom. Pri osadzovaní bezvývodových integrovaných obvodov asistoval Ing. Lukáš Novák, toho času doktorand na ústave UMEL a asistent vedúceho diplomovej práce, za čo si zaslúži vďaka. Fotografia osadenej dosky je na obrázku 3.9.

Overenie funkčnosti prebiehalo v niekoľkých krokoch. Osadený shield sa pripojil na Nucleo dosku. Po pripojení vývojovej platformy k napájaniu a osadení gombíkovej batérie sa zmerali napájacie napätie obidvoch zdrojov a taktiež napájanie komunikačných portov, ktoré má vlastný rozvod. Všetky napätia boli správne. Ďalej bolo nutné začať overovať základnú funkčnosť a k tomu bolo potrebné začať programovať mikrokontrolér.

Na programovanie mikrokontroléru dodáva výrobca vývojovej platformy softvérový balík programov CubeMX a CubeIDE. Prvý slúži na rozvrhnutie pinov mikrokontroléru, definovanie komunikačných portov a ich vlastností ako rýchlosti komunikácie a podobne, definovanie hardvérových prerušení a systému priameho prístupu do pamäte, návrh deličiek hodinového signálu s automatickým prepočítavaním a prispôbovaním. Druhý program slúži na tvorbu kódu, asistovanie pri písaní kódu, kompilovanie programov a ich nahrávanie cez rozhranie USB do mikrokontroléru a taktiež ako komplexný nástroj na hľadanie chýb cez krokovanie programu naživo počas behu mikrokontroléru s vhladom do systémových premenných a registrov. Tento projekt bol realizovaný pomocou tohto prostredia, pretože poskytuje zjednodušené príkazy na ovládanie zložitých zberníc a funkcií pod súborom knižníc HAL. [47]



Obrázok 3.9 Zariadenie po osadení komponentami

Za základné funkcie obvodu sa považuje sprevádzkovanie obvodu GNSS a ukladanie dát z tohto modulu na pamäťovú kartu. Toto sú najzložitejšie komponenty na DPS a ich funkčnosť je kľúčová pre najzákladnejšiu funkciu projektu. Prvým krokom bolo zistiť, či GNSS modul vysiela dáta po sériovej linke, na ktorej je pripojený a či sú dáta koherentné a odpovedajú popisu v dokumentácii. Modul by mal disponovať funkciou

EASY™, vďaka ktorej by mal byť modul schopný aspoň základnej funkcie bez potrebného zásahu užívateľa. Do mikrokontroléru sa naprogramoval jednoduchý kód, ktorý prenášal dáta prijímané zo sériovej linky GNSS modulu na sériovú medzi mikrokontrolérom a počítačom. Využíval funkciu HAL\_UART\_RECEIVE a HAL\_UART\_TRANSMIT. Tieto funkcie sa neodporúča používať mimo základné testovanie, pretože sú blokovacie. To znamená, že funkcia čaká definovaný čas na to, než sa môže vykonať a počas tohto času je procesor plne vyťažený touto činnosťou, nemôže vykonávať iné činnosti. Taktiež je možné, že počas posielania dát by procesor nebol práve v stave, kedy prijíma dáta vyslané dáta by boli stratené. Sériový port bol nastavený podľa pokynov od výrobcu v dokumentácii, nastavenie je na obrázku 3.10.

Baud Rate	9600 Bits/s
Word Length	8 Bits (including Parity)
Parity	None
Stop Bits	1

Obrázok 3.10 Nastavenie sériového portu GNSS podľa výrobcu

Výsledky teda síce boli občas nepravidelné z dôvodov vyššie spomenutých, ale pri vhodnom nastavení bolo možné zachytiť aspoň niekoľko správnych prenosov, príklad na obrázku 3.11. Z nich je viditeľná štruktúra správ, ktoré GNSS modul posiela a bude hlbšie rozobraná v nasledujúcej kapitole.

```
$GPRMC,000858.878,V,,,,,0.00,0.00,060180,,,N,V*3A
$GPVTG,0.00,T,,M,0.00,N,0.00,K,N*32
$GPGGA,000858.878,,,,,0,0,,,M,,M,,*4A
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,1*03
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,2*00
$GPGSV,1,1,00,0*65
$GLGSV,1,1,01,80,,,21,1*72
$GPGLL,,,,,000858.878,█
```

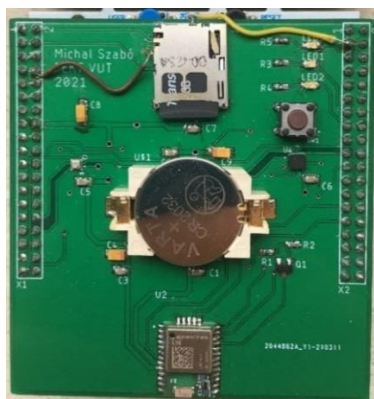
Obrázok 3.11 Ukážka prijatej správy preposlanej do PC

Overenie funkčnosti pamäťovej karty bolo zložitejšie. Dokumentácia od výrobcu sa hlbkovo venuje každej drobnej funkcii portu SDMMC a driveru FATFS, ktoré umožňujú prácu s pamäťovou kartou. Bohužiaľ ale veľmi dobre nepopisujú, ako čo najjednoduchšie overiť, že systém je funkčný. Pri bližšom skúmaní nastavení v rozhraní CubeMX sa objavil nedostatok obvodového návrhu. Driver FATFS požaduje, aby jeden vstupno-výstupný pin bol určený pre detekciu prítomnosti pamäťovej karty v slotu. Táto požiadavka nebola objavená skôr než pri overovaní funkčnosti a musela sa vyriešiť dodatočnými úpravami DPS. Bol vybraný vhodný voľný pin na doske. Drôtni s pevným jadrom bolo pripojené tlačidlo vstavané do slotu medzi zemný potenciál a vstupný pin, fotografia je na obrázku 3.12. [49]

V nastaveniach CubeMX bol pinu pridelený interný pull-up odpor, aby stav tohto pinu bol len v log. 1 alebo log. 0. Správnym nastavením tohto pinu sa vyriešili prvotné problémy, ktoré komunikácia vykazovala. Vstavané funkcie driveru FATFS, ktoré budú



hlbšie rozobrané v nasledujúcej kapitole môže pri nesplnení ich činnosti vrátiť chybovú hlášku, ktorá popisuje prečo nebolo možné príkaz splniť. [49]



Obrázok 3.12 Shield po úprave kvôli chýbajúcemu pinu pre detekciu MicroSD karty

Popis týchto chybových hlášok ale nie je veľmi detailný a užívateľ sa musí spoliehať na jeho vlastné schopnosti hľadania problémov, ktoré mohli nastať a prípadne na komunitu užívateľov na internete, ktorí narazili na podobné problémy. Vyriešením niekoľkých problémov pri vytváraní, otváraní, zápise a uzatváraní súborov sa úspešne podarilo zapísať akékoľvek dáta do súboru a potom ich po pripojení pamäťovej karty k PC otvoriť a prechádzať. [49]

Týmto sa overili základné funkcie, ktoré sú potrebné na návrh komplexnejšieho softvéru. Overenie funkcie akcelerometru a gyroskopu bude nasledovať až po dokončení softvéru, ktorý dokáže rozobrať dáta z GNSS modulu, poskladať ich do formátu, ktorý je ľahšie pochopiteľný a zapísať ich do súboru, v ktorom bude každý zápis prehľadný.

### 3.4 Komunikačné protokoly a príkazy

Pre správnu funkciu a používanie všetkých komponentov je nutné pochopiť, v akom formáte odosielať potrebné dáta a ako im odosielať príkazy a tak prispôbovať ich funkcie podľa potrieb programu alebo užívateľa. Najzložitejší systém správ a príkazov zo všetkých použitých komponentov má GNSS modul.

GNSS modul Quectel L96, podobne ako ostatné navigačné moduly podlieha štandardom, ktoré sa používajú v námorných a pozemných navigačných zariadeniach NMEA, čo je skratka pre Národnú asociáciu námornej elektroniky. Tento štandard vznikol ako unifikácia pre zariadenia, ktoré získavajú akékoľvek dáta o polohe a ktoré tieto dáta zase ďalej spracovávajú. NMEA štandard obsahuje sériu príkazov a správ, vid'. Tabuľka 5, Tabuľka 6, ktoré majú definovaný tvar a usporiadanie informácií v nich. Každá správa či príkaz obsahuje začiatkový znak \$ a konečný znak \*, ktoré slúžia ako riadiace znaky pre príjemcov. Správy o navigácii, ktoré vysiela polohovacie zariadenie majú niekoľko štandardizovaných predpôň, podľa ktorých príjemca vie,

aké dáta a v akom poradí sú v správe usporiadané. Zoznam týchto správ so stručným popisom zobrazuje Tabuľka 5. [46]

Tabuľka 5 Predpony správ v štandardizovanej komunikácii NMEA – prevzaté z [46]

GPRMC/GNRMC	Základné odporúčané minimum dát Čas, dátum, poloha, rýchlosť
GPVTG	Dáta o kurze a rýchlosti Kurz, rýchlosť v uzloch a km/h
GPGGA	Korekčné dáta, dáta o 3D lokácii Poloha, počet použitých satelitov, údaj o nepresnosti, nadmorská výška
GPGSA/GNGSA/GAGSA	Výpis satelitov podľa služby (GPS, GLONASS,...) Nepresnosť pre každú zo skupín
GPGLL/GNGLL	Jednotlivé informácie o viditeľných satelitoch Poloha na oblohe, úroveň signálu
GPGLL/GNGLL	Geografická šírka a dĺžka a čas

Poradie informácií v týchto jednotlivých vetách, ako by sa jednotlivé správy dali nazývať, je fixné, pričom jednotlivé informácie sú oddelené čiarkou, ktorá sa opäť dá použiť ako riadiaci znak. Problém pri zachytávaní a spracovaní týchto správ je komplikovaný v tom, že nikdy nemajú fixnú dĺžku a ani ich počet nie je vždy rovnaký. Dôvodom je, že pokiaľ modul nemá dáta, ktoré by v určitom poli mali byť zapísané, tak ich absencia nie je nahradená nejakým zástupným znakom, napr. 0, ale toto pole je prázdne. Ďalšou možnosťou, prečo tomu tak je, je že niektoré položky môžu mať viac či menej číslíc, napr. rýchlosť, ktorá môže byť vyjadrená len v jednotkách, ale aj v desiatkach či dokonca stovkách. Opäť, zástupné znaky táto komunikácia nemá a teda sa bude meniť celková dĺžka tejto správy. V prípade, že satelitov viditeľných pre GNSS modul je viac než sa zmestí do jednej -GSV správy, musí ich byť vyslaných viac, čo predlžuje celkový počet odoslaných riadkov. Kvôli tomu nemôže program, ktorý obstaráva zachytávanie týchto správ počítať počet znakov, ktoré má prijať, ale musí pracovať s riadiacimi znakmi, ktoré mu poskytujú posielané správy. Podrobný obsah jednotlivých správ obsahuje Príloha A - Zoznam NMEA správ a ich obsah. [46]

Tabuľka 6 Štruktúra štandardnej NMEA správy – prevzaté z [46]

Časť správy	\$	Identif. zdroja	Identif. správy	Dátové polia oddelené ,	*	Kontrolný súčet	<CR><LF>
Počet bitov	1	2	3	Variabilný	1	2	2

Na ovládanie GNSS modulu slúžia príkazy, ktoré majú podobný formát, ale s predponou PMTK. PMTK vety sú príkazy označované trojmiestnym číslom, vid'. Tabuľka 7. Bežné príkazy sú univerzálne pre všetky zariadenia a majú rezervované



hodnoty. Špeciálne príkazy, ktoré sú špecifické pre dané zariadenie sa môžu meniť a je nutné mať dostupnú dokumentáciu, ktorá tieto informácie obsahuje. V prípade modulu Quectel L96 bolo práve toto komplikácia. Výrobca modulu počas prípravy softvéru vykonával aktualizáciu webových stránok a dostupná bola len veľmi základná dokumentácia obsahujúca parametre a zapojenie súčiastky. Informácie o komunikačnom protokole pre tento konkrétny modul neboli dostupné ani u výrobcu, ani na inom mieste na internete. Bolo nutné napísať výrobcovi e-mail s prosbou o zaslanie potrebného dokumentu. Napriek tomu, že výrobca pochádza z Čínskej ľudovej republiky dorazila odpoveď z ich európskej pobočky a obsahoval potrebný dokument. Vodoznak v dokumente „Quectel Confidential“ ale naznačuje, že dokument nie je určený pre verejné šírenie a je vždy nutné si ho vypýtať. [46]

Bežné PMTK príkazy súvisia najmä s napájacími funkciami. Jedná sa o módy reštartovania, ktoré môže byť rýchle, čiastočné alebo úplné. PMTK príkazom je taktiež možné uviesť modul do režimu spánku, v ktorom výrazne zníži spotrebu energie a vypne vysielanie polohy, ale po prebudení ju môže okamžite znovu začať posielať. Ďalšie príkazy sa týkajú zvláštnych funkcií, ktorými modul disponuje. Tie sa týkajú nastavenia Baud rate, sériového portu, rýchlosti odosielania dát, zapínania Diferenciálnej GPS, voľba satelitnej služby, zapínanie QZSS módu, poloha a rýchlosť vyjadrená ako karteziánske koordináty v metroch a metroch za sekundu a ďalšie. Okrem zadávania príkazov je možné týmto spôsobom aj získať dodatočné informácie, ktoré nie sú vysielané v NMEA správach. Odpovede modulu sú v podobnom formáte ako sú samotné príkazy, teda s predponou PMTK. [46]

Tabuľka 7 Štruktúra štandardného PMTK príkazu/odpovede – prevzaté z [46]

Časť správy	\$	Ident. Zdroja (P)	Ident. Správy (MTK)	Druh paketu	Dáta paketu	*	Kontrolný súčet	<CR><LF>
Počet znakov	1	1	3	3	Variabilné	1	2	2

Zoznam všetkých príkazov obsahuje Príloha A -Zoznam NMEA MTK príkazov. Tabuľka 8 zobrazuje príkazy, ktoré boli použité v tomto projekte s nastavenými hodnotami. Tieto príkazy sú odoslané GNSS modulu po štarte programu a menia jeho konfiguráciu, aby bol naplno využitý jeho potenciál. Paket 225 nastavuje režim činnosti GNSS modulu, plnú prevádzku a režimy spánku. Týmto príkazmi sa zariadenie uvádza do spánku a znovu sa prebúda. Je možné nastaviť časovač, ktorý určuje ako často sa zariadenie prebúda zo spánku a podobne. Nastavený režim využíva vstavanú technológiu AlwaysLocate™, ktorou toto zariadenie disponuje. V tomto režime sa zariadenie po zameraní polohy a odoslaní informácii po sériovej linke prepne do režimu spánku. Automatiky sa zase prebudí, keď je potrebné znovu zamerať polohu,

podľa nastavenia o perióde zameriavania. Toto nastavenie výrazne znižuje spotrebu elektrickej energie, pričom užívateľ nemusí zvažovať iné nastavenia. Paket 251 nastavuje Baud rate sériovej linky UART, v tomto prípade je to 57600 Baud/s. Základné nastavenie je 9600 Baud/s, ale čím rýchlejšie sú dáta prenesené, tým dlhšie môže byť zariadenie v režime spánku a šetriť elektrickú energiu. Paket 314 nastavuje, ktoré NMEA vety majú byť vysielané v každej správe a frekvencia, s ktorou majú byť vysielané. Môžu byť buď vypnuté alebo pri každom n-tom zameraní, pričom n môže mať hodnotu 1 až 5. V tomto prípade sú zapnuté všetky základné správy pri každom zameraní polohy. Paket 352 nastavuje, či je služba QZSS zapnutá alebo vypnutá, v tomto prípade je vypnutá. Dôvod je, že služba QZSS je dostupná len na Japonskom polostrove a v jeho okolí a teda pre tento projekt nie je potrebné vyhľadávanie tejto služby. Paket 353 nastavuje, aké GNSS služby budú vyhľadávané. Ako už bolo spomínané, na výber je zo služieb GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou. Nanešťastie ale nie je možné používať všetky služby súčasne. Služby GLONASS a Galileo nie je možné spustiť zároveň so službou BeiDou. Zároveň sa neodporúča mať spustenú len jednu zo služieb GLONASS, Galileo a BeiDou, pravdepodobne z dôvodu nedostatočného pokrytia týchto služieb. Základné nastavenie bez zásahu užívateľa je kombinácia GPS a GLONASS. Paketom je zapnutá ešte služba Galileo a tieto tri služby dokážu fungovať paralelne. Táto možnosť bola vybraná z dôvodu maximalizácie počtu použiteľných satelitov v zornom poli modulu. [46]

Tabuľka 8 Zoznam PMTK príkazov použitých v programe s hodnotami –prevzaté z [46]

Paket	Názov paketu	Hodnota
225	PMTK_SET_PERIODIC_MODE	8
251	PMTK_SET_NMEA_BAUDRATE	57600
314	PMTK_API_SET_NMEA_OUTPUT	1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
352	PMTK_API_SET_STOP_QZSS	1
353	PMTK_API_SET_GNSS_SEARCH_MODE	1,1,1,0
886	PMTK_FR_MODE	2

Aj keď je BeiDou vyspelou službou s celosvetovým pokrytím, v európskom priestore je služba Galileo prospešná. Mat' preto k dispozícii 3 služby je viac ako 2. Počet zapnutých služieb má taktiež vplyv na obnovovaciu frekvenciu zamerania. Ak by bola zapnutá len služba GPS, je možné zamerať polohu až 10 krát za sekundu. Pri zvolení dvoch paralelných služieb je možné zamerať polohu 5 krát za sekundu a pri zapojení troch služieb je zameranie raz za sekundu. Vyššia frekvencia zamerania je lepšia pri zaznamenávaní rýchlych zmien smeru pohybu. Tieto zmeny ale budú presnejšie detegované pomocou lokálneho IMU a vnášané do výslednej polohy pomocou fúzných a filtračných algoritmov. Úlohou GNSS zameriavania je prinášať čo najpresnejšie dáta o polohe na začiatok zameriavania aj v zložitých podmienkach, kedy môže byť priama

viditeľnosť na oblohu obmedzená alebo signál môže byť skreslený okolitým rušením. Preto je potrebné mať k dispozícii čo najviac satelitov, aby sa pravdepodobnosť správneho zamerania zvýšila. [46]

Komunikácia medzi užívateľom a pamäťovou kartou je veľmi zjednodušená vďaka hardvérovému rozhraniu, ktoré je zabudované do mikrokontroléru a vrstve driveru, ktorá sa stará o správnu prácu so súborovým systémom FAT. Bežná komunikácia medzi mikrokontrolérom a pamäťovou kartou prebieha cez sériové rozhranie SPI, ktoré musí byť zdieľané s ďalšími zariadeniami, ak sú prítomné. Špecializované rozhranie SDMMC dokáže natívne komunikovať s pamäťovými médiami štandardným rozhraním a rýchlosťami pre tieto média. Je možné si zvoliť metódu komunikácie po tomto rozhraní, pričom najrýchlejšia je prirodzene metóda s najvyšším počtom dátových vodičov, v tomto prípade 4 dátové vodiče. Frekvencia hodinového signálu môžu byť nastavená až do desiatok MHz, v tomto prípade je nastavená na 16 MHz. Aby sa ale mohli zapisovať dáta na pamäťové médium, nie je možné len prenášať dáta komunikačným rozhraním. Dáta na pamäťovom médiu sú usporiadané do súborov s menami a príponami, ktoré definujú ich typ a tieto súbory zaberajú určitú časť z úložného priestoru na pamäťovom médiu. Súborový systém sa stará o to, aby boli súbory uložené na známych miestach v pamäti a uchováva si informácie, kde, v akom adresári, má hľadať začiatok každého súboru. Zároveň sa stará o práva užívateľov na zápis a čítanie súborov a bráni vymazaniu chránených súborov. Všetky tieto funkcie by boli náročné na implementáciu pre jednotlivých užívateľov a preto ich výrobca mikrokontroléru a vývojového prostredia ponúka ako zásuvný modul, driver, pre súborový systém FAT, ktorý je štandardom v tejto oblasti. Práca s pamäťovou kartou pripojenou k mikrokontroléru potom pripomína prácu s externými pamäťovými médiami na osobnom počítači. Tabuľka 9 ukazuje, aké príkazy boli použité pre ovládanie pamäťovej karty. [49]

Pokiaľ nie je signál SD\_DET na log. 0, teda nie je detegovaná pamäťová karta v slotě MicroSD, tak každá funkcia vráti chybový stav FR\_NOT\_OK. Je to chyba, ktorá nie je veľmi dobre popísaná v dokumentácii driveru, je popísaná len ako všeobecná hardvérová chyba a pokiaľ užívateľovi nie je úplne jasné, ako detekcia pamäťovej karty funguje, v akom stave je aktívna, môže to viesť k veľmi zdĺhavému hľadaniu chyby. Potenciálnych miest pre chybu je v tak zložitom protokole mnoho, či sa už jedná o chyby časovania, nesprávnych logických úrovní kvôli chýbajúcim pull-up odporom alebo základné chyby zapojenia. Preto je veľmi podstatné si overiť, že je tento signál správny. Príkaz f\_mkfs sformátuje pamäťovú kartu, takže všetky dáta, ktoré boli dovtedy uložené budú zmazané bez varovania. Používať by sa mal len v prípade prvého zapojenia, aby sa uistil, že formát súborového systému na pamäťovej karte je kompatibilný s driverom FATFS bežiacim na mikrokontrolére. Príznakom tomuto príkazu je možné definovať druh súborového systému, či je to už FAT16, FAT32 alebo exFAT. Príznakom FM\_ANY sa vyberie vhodný súborový systém podľa veľkosti pamäťového média.

Najväčší zväzok formátovaný vo FAT16 môže mať veľkosť 2 GB, vo FAT32 2 TB a v exFAT teoreticky až 128 PB. Príkazom `f_open` je možné vytvárať a otvárať súbory na disku. Príznakom tejto funkcie sa mení správanie funkcie. [49]

Tabuľka 9 Zoznam funkcií FATFS, ktoré boli použité v tomto projekte – prevzaté z [49]

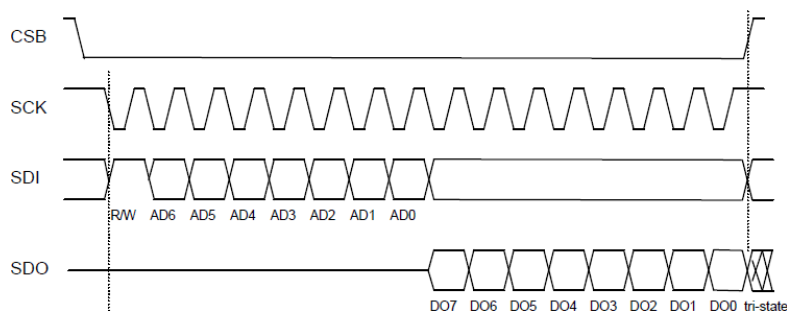
Funkcia	Príznačky	Popis
<code>f_mount</code>	-	Pripojenie diskovej jednotky
<code>f_mkfs</code>	FM_ANY	Vytvorenie súborového systému
<code>f_open</code>	FA_WRITE FA_OPEN_ALWAYS FA_OPEN_APPEND	(Vytvorenie a) otvorenie súboru
<code>f_write</code>	-	Zápis dát do súboru
<code>f_sync</code>	-	Zápis dát v pamäti cache na pamäťovú kartu
<code>f_close</code>	-	Zápis dát v pamäti cache na pamäťovú kartu a uzatvorenie súboru

Použitý príznak `FA_WRITE` hovorí, že súbor bude otvorený alebo vytvorený na zápis. Príznak `FA_OPEN_ALWAYS` otvorí existujúci súbor a ak neexistuje, tak ho vytvorí a otvorí. Má výhodu oproti iným príznakom, pretože sa nevráti s chybou, pretože súbor neexistuje alebo pretože súbor s rovnakým menom už existuje. Príznak `FA_OPEN_APPEND` otvorí existujúci súbor a dáta do neho zapísané budú pripísané na koniec súboru, takže dáta zapísané predtým nebudú prepísané. Je vhodné tieto príkazy používať za sebou v danom poradí. Vďaka tomu nebudú vznikať chyby pri vytváraní a zápise a ani sa neprepíšu žiadne dáta. Príkaz `f_write` zapíše pole, ktoré mu užívateľ dá zapísať. Príkaz `f_sync` a `f_close` sú si podobné. Obidva vyprázdnia pamäť cache do pamätej karty, príkaz `f_close` k tomu ešte zatvorí súbor. Pre kontinuálny záznam dát ako je tento prípad je vhodnejšie použiť periodicky príkaz `f_sync`. Je nutné priebežne dáta z pamätej cache vyprázdňovať, aby pri prípadnom výpadku napájania alebo neočakávanom odpojení pamätej média nedošlo k strate dát, ktoré neboli prenesené. Na druhú stranu neustále zatváranie a otváranie súboru môže spôsobiť saturáciu rozhrania, kedy by mohla prísť požiadavka na zápis do súboru v momente, kedy je súbor zatvorený a ešte sa vykonalo jeho otvorenie. [49]

Ovládanie integrovaného obvodu IMU sa v základe nelíši od iných periférií, ktoré na komunikáciu používajú sériové rozhranie. Obvod je schopný komunikovať sériovými protokolmi I<sup>2</sup>C a SPI, pričom v každom z nich sa správa ako podriadené zariadenie mikrokontroléru. Čaká na výzvu mikrokontroléru a požiadavku na odpoveď s príslušnými dátami. Prvý z nich je jednoduchší na integráciu s mikrokontrolérom, ktorý má obmedzený počet vstupno-výstupných pinov, pretože na komunikáciu s viacerými zariadeniami potrebuje len dva vodiče. Pre výber správneho zariadenia na komunikáciu využíva unikátne adresy, ktoré má každé zariadenie. Nutnosť adresácie a použitie

len jedného vodiča pre dátový tok limituje rýchlosť toku dát po tejto zbernici, hodinová frekvencia je v najlepších prípadoch v stovkách kHz. SPI je protokol jednoduchší na integráciu a rýchlejší minimálne o rád, výrobca pre tento konkrétny integrovaný obvod udáva maximálnu frekvenciu hodinového signálu 10 MHz. Tento protokol používa o jeden dátový vodič navyše, dátová komunikácia je v každom vodiči jednosmerná. Výber destinácie pre požiadavku sa vykonáva výberovým signálom na štvrtom pine SPI portu. Použitý mikrokontrolér má ale dostatok pinov a preto bola vybraná rýchlejšia zbernica. Podľa výrobcu integrovaný obvod po pripojení napájania funguje v I<sup>2</sup>C režime a pokiaľ to má tak ostať, odporúča, aby sa pin na výber destinácie natrvalo pripojil k napájaniu. Aby sa zbernica prepla do režimu SPI, musí sa kedykoľvek po pripojení napájania na výberovom pine objaviť nábežná hrana. Potom už bude zbernica fungovať v režime SPI až do reštartovania napájania. [43]

Získavanie dát z IMU sa realizuje na základe požiadavky na vydanie obsahu registru na odoslanej adrese. Detailne je táto komunikácia na obrázku 3.13. Mikrokontrolér ako nadradený člen v komunikácii prepne výber čipu z log. 1 do log. 0. Potom spustí hodinový signál a zároveň s ním na dátovom vstupe periférie bit po bite zapisuje adresu registru, ktorého obsah chce, aby bol odoslaný naspäť. Prvý byt je voľba medzi zápisom a čítaním na adresu, ktorá nasleduje a má 7 bitov. Pre čítanie z adresy je prvý bit log. 1. Po odoslaní adresy reaguje periféria tak, že na dátovom signály, ktorý je pre ňu výstup bit po bite odosiela dáta z požadovaného registru synchronne s hodinovým signálom, ktorého zdrojom je stále mikrokontrolér. Po prijatí 8 bitov sa zastaví hodinový signál a výber čipu sa prepne z log. 0 do log. 1. Zápis dát do registru periférie prebieha obdobne, ale prvý bit je log. 0 a dáta sú do periférie vysielané tým istým dátovým pinom, ktorým bola odoslaná aj adresa. Je možné čítať aj viac než len jednu adresu jednou požiadavkou. Ak mikrokontrolér po prijatí bajtu neprestane vysielat' hodinový signál a výber čipu stále udržiava v log. 0, tak IMU automaticky navýši adresu o 1 a na výstup posiela dáta tejto navýšenej adresy až kým nedôjde do konca. [43]



Obrázok 3.13 Čítanie dát zbernicou SPI v režime 11 – prevzaté z [43]

SPI zbernica, aj keď jej základy sú štandardizované medzi výrobcami periférnych integrovaných obvodov, tak aj medzi jednotlivými výrobcami sú určité odchýlky, ktoré musí driver týchto zberníc ovládať. Hlavnými odchýlkami sú tzv. režimy SPI. Definujú ich dve čísla v dvojkovej sústave. Prvá číslica hovorí, akú polaritu má neaktívny

hodinový signál, ak je to 0, tak je v log. 0 a ak 1 tak v log. 1. Druhá číslica zase definuje fázu hodinového signálu, teda či je hodnota na dátových pinoch validná pri nábežnej alebo zostupnej hrane hodín. Tento konkrétny integrovaný obvod je kompatibilný s režimami 00 a 11. [43]

Popis obsahu registrov dodáva výrobca v katalógovom liste obvodu. Niektoré registre slúžia len na čítanie, do iný môže byť vykonaný aj zápis. Tak sa menia nastavenia IMU. Ako už bolo vysvetlené v teoretickej časti, základné IMU sa skladá z gyroskopu a akcelerometru. BMX160 od firmy Bosch je deväťosé IMU, pretože obsahuje ešte magnetometer. Ten meria intenzitu magnetického poľa v troch osiach a teda funguje ako digitálny kompas. Prirodzene jeho funkčnosť závisí na intenzite umelých magnetických polí v okolí, ktoré majú veľký vplyv na správnosť merania. Pri pohľade na funkčné bloky tohto IMU a popis fungovania je zrejmé, že kým akcelerometer a gyroskop fungujú ako spriahnuté zariadenia, magnetometer od nich funguje oddelene. To platí aj pri nastaveniach uspávania senzorov, ktoré platia zvlášť pre gyroskop a akcelerometer a zvlášť pre magnetometer. IMU BMX160 taktiež disponuje viacerými dedikovanými funkciami, ktoré sú výhodné, ak je použité v nejakom zariadení, ktoré je ovládané pomocou pohybu alebo polohy. Dokáže detegovať významné polohy zariadenia ako položenie naplocho alebo otočenie do nejakého smeru, teda horizontálne alebo vertikálne, ideálne pre otočenie polohy dotykového displeja. Má taktiež signalizáciu excesívnych zrýchlení, ktoré môžu byť využité ako predčasná detekcia pádu zariadenia na zem. Okrem polohy a pohybu dokáže samostatne detegovať ťuknutie, napríklad na displej alebo časť prístroja. Obsahuje taktiež krokomer, ktorý teda netreba pracne programovať. Všetky tieto nastavenia, ktoré vychádzajú z dát akcelerometru, gyroskopu a magnetometru sú ale v tomto projekte nepotrebné a nebudú použité. [43]

Väčšina registrov, ktoré obsahuje Tabuľka 10 nepotrebujú zložité vysvetlenie, ako fungujú. Dátové registre obsahujú priame výstupy z jednotlivých registrov, každá os merania má rozlíšenie 16 bitov a podľa nastaveného rozsahu, viď. Tabuľka 11, sa mení aj veľkosť základnej jednotky veličiny, ktorú reprezentuje najmenej významný bit. Rozsahy jednotlivých senzorov sa nastavujú v príslušných registroch s príponou `_RANGE`. To, či sú dáta na príslušných registroch platné sa dá zistiť kontrolou bitov v registri `STATUS`. Samozrejme to nie je ideálny spôsob, ako zisťovať, či sú dáta pripravené na prenos. Integrovaný obvod disponuje veľkým množstvom možných interných signálov prerušenia a všetky sa dajú prepojiť na dva externé piny prerušenia. Potom sa mikrokontrolér dá nastaviť tak, aby pri príchode signálu prerušenia, že dáta sú pripravené na prenos, mikrokontrolér preruší činnosť, preniesie nové dáta a opäť sa vráti k predchádzajúcej činnosti. Keďže mikrokontrolér ale prijíma dáta z viacerých periférii, mohlo by sa stať, že prijímanie jedných dát by bolo prerušené druhým prijímaním a došlo by k strate dát. Pri práci s prerušeniami je nutné nastavovať priority procesov, ktoré majú prednosť pred ostatnými. Tento problém by sa dal vyriešiť zriadením priameho prístupu do pamäte, ktorým tento mikrokontrolér disponuje.

Priamym prístupom do pamäte nie je zaťažovaný procesor presunom dát z periférie do pamäte RAM, ale samotný hardvér na obsluhu portov môže presúvať dáta do RAM a procesor môže vykonávať svoju činnosť bez prerušenia, po dokončení dát len obdrží správu, že bol prijatý potrebný počet bitov. [43]

Tabuľka 10 Zoznam dôležitých registrov integrovaného obvodu BMX160 [43]

Adresa hex	Názov registru	Popis funkcie
0x03	PMU_STATUS	Stav jednotlivých jednotiek, prepínanie do režimov šetrenia energie a plnej prevádzky
0x04 – 0x05	DATA_0 – DATA_1	Magnetometer os x
0x06 – 0x07	DATA_2 – DATA_3	Magnetometer os y
0x08 – 0x09	DATA_4 – DATA_5	Magnetometer os z
0x0C – 0x0D	DATA_8 – DATA_9	Gyroskop os x
0x0E – 0x0F	DATA_10 – DATA_11	Gyroskop os y
0x10 – 0x11	DATA_12 – DATA_13	Gyroskop os z
0x12 – 0x13	DATA_14 – DATA_15	Akcelerometer os x
0x14 – 0x15	DATA_16 – DATA_17	Akcelerometer os y
0x16 – 0x17	DATA_18 – DATA_19	Akcelerometer os z
0x18 – 0x1A	SENSORTIME_0 – _2	Časovač pre integrovaný obvod
0x1B	STATUS	Stav dát senzorov na registroch
0x22 – 0x23	FIFO_LENGTH_0 – _1	Miera zaplnenia pamäte FIFO
0x24	FIFO_DATA	Dátový výstup z pamäte FIFO
0x40	ACC_CONF	Nastavenie Low-pass filtru a rýchlosti merania dát pre akcelerometer
0x41	ACC_RANGE	Rozsah akcelerometru
0x42	GYR_CONF	Nastavenie Low-pass filtru a rýchlosti merania dát pre gyroskop
0x43	GYR_RANGE	Rozsah gyroskopu
0x44	MAG_CONF	Nastavenie rýchlosti merania dát pre magnetometer
0x46 – 0x47	FIFO_CONFIG_0 – _1	Konfigurácia pamäte FIFO
0x4C – 0x4F	MAG_IF_0 – _3	Komunikačný port s magnetometrom a nastavenie offsetu magnetometru
0x71 – 0x73	OFFSET_0 – _3	Offset akcelerometru
0x74 – 0x76	OFFSET_4 – _5	Offset gyroskopu
0x77	OFFSET_6	Horné dva bity offsetu gyroskopu a zapínanie kompenzácie

Vzhľadom na to, že pri prijatí dát je potrebné vykonávať ďalšie úkony, nie je toto riešenie úplne ideálne. Zvlášť, keď integrovaný obvod BMX160 ponúka ešte jednu

možnosť, ako bez straty dát z ktorejkoľvek periférie prijať dáta z tejto periférie vtedy, keď procesor nevykonáva žiadnu dôležitú činnosť.

Tabuľka 11 Presnosť senzorov BMX160 v jednotlivých rozsahoch – prevzaté z [43]

Senzor	Rozsah	Najmenšia jednotka veličiny LSB
Akcelerometer	$\pm 2 g_0$	0,0000610 $g_0$ (0,000599 $m/s^2$ )
	$\pm 4 g_0$	0,000122 $g_0$ (0,00120 $m/s^2$ )
	$\pm 8 g_0$	0,000244 $g_0$ (0,00239 $m/s^2$ )
	$\pm 16 g_0$	0,000488 $g_0$ (0,00479 $m/s^2$ )
Gyroskop	125 °/s	0,00381°
	250 °/s	0,00762°
	500 °/s	0,0146°
	1000 °/s	0,0292°
	2000 °/s	0,0610°
Magnetometer	$\pm 1150 \mu T$ (os x, y)	0,3 $\mu T$
	$\pm 2500 \mu T$ (os z)	

Obvod disponuje pamäťou FIFO, do ktorej môže ukladať dáta zo všetkých senzorov. Udávaná kapacita pamäte podľa výrobcu je až 0,75 sekúnd záznamov akcelerometru a gyroskopu a až 0,5 sekúnd, pokiaľ sa zaznamenáva aj magnetometer rovnakou frekvenciou záznamov. Prirodzene táto kapacita sa mení podľa frekvencie meraní, ale táto doba by mala stačiť na to, aby procesor v čase, kedy nevykonáva žiadnu časovo náročnú operáciu prebral všetky nahromadené dáta a vykonal na nich matematické operácie. Konfigurácia FIFO pamäte, jej naplňovania a spôsob ukladania dát do nej je možný v registri FIFO\_CONF. Úroveň naplnenia pamäte FIFO sa zase dá sledovať v registroch FIFO\_LENGTH, ak ukazujú hodnotu 0, tak je FIFO prázdne. Čítanie dát z pamäte FIFO je pomerne jednoduché. Dáta sú uložené na adrese 0x24 a pokiaľ sú v pamäti FIFO dáta, tak ovládač SPI zbernice integrovaného obvodu nenavíši adresu čítaného registru, ale automaticky pri neprerušenom čítaní vracia postupne všetky hodnoty, ktoré sú uložené v pamäti FIFO. Ak dôjde k neúplnému vyprázdneniu, tak si pamäť zachová poslednú neprenesenú informáciu a čaká na ďalšiu požiadavku. Ako bolo uvedené, frekvencia snímania dát zo senzoru je nastaviteľná, spolu aj s dolnou priepusťou, ktorá eliminuje šum na senzore. Detaily o frekvencii dátového výstupu a filtri šumu obsahuje Tabuľka 12. [43]

Zvýšením frekvencie dátového výstupu sa zlepšujú jeho možnosti presnejšie referovať o zmenách veličín, ktoré merajú, ale zároveň sa zvyšuje aj meraný šum. Preto je vhodné vysoké frekvencie dátového výstupu kombinovať s efektívnym hardvérovým číslicovým filtrom typu dolná prepusť, aby sa čo najviac eliminoval vstupný šum. Magnetometer má taktiež nastaviteľnú frekvenciu dátového výstupu, a to až do 800 Hz. Bohužiaľ ale z dôvodu, že magnetometer je od ostatných senzorov oddelený, musí



byť ďalšie nastavovanie vykonávané cez zvláštne rozhranie magnetometru. To má vlastné adresy registrov MAG\_IF, ktorým sa vkladajú dáta, ktoré budú prenesené do registrov magnetometru a opačne. Preto nie sú dostupné nastavenia filtrov, je možné len vágne udať režimy funkcie, v ktorých magnetometer operuje. [43]

Tabuľka 12 Možné nastavenia frekvencie dátového výstupu senzorov s medznými frekvenciami filtru dolnej priepuste – prevzaté z [43]

Frekvencia dátového výstupu	Medzná frekvencia dolnej priepuste akcelerometru	Medzná frekvencia dolnej priepuste gyroskopu
12,5 Hz	5,06 Hz	-
25 Hz	10,12 Hz	10,7 Hz
50 Hz	20,25 Hz	20,8 Hz
100 Hz	40,5 Hz	39,9 Hz
200 Hz	80 Hz	74,6 Hz
400 Hz	162 Hz (155 Hz v ose z)	136,6 Hz
800 Hz	324 Hz (262 Hz v ose z)	254,6 Hz
1600 Hz	684 Hz (353 Hz v ose z)	523,9 Hz
3200 Hz	-	890 Hz

Aby boli dáta správne skalibrované, môžu sa do registrov s príponou OFFSET naplniť kalibračné hodnoty, ktoré by mali vynulovať výstupné hodnoty senzorov, pokiaľ je senzor v pokoji relatívne voči okolitému prostrediu. Kvôli šetreniu energie je možné registrom PMU\_STATUS uvádzať jednotlivé senzory obvodu BMX160 do stavu spánku, nízkej spotreby energie alebo normálnej prevádzky. [43]

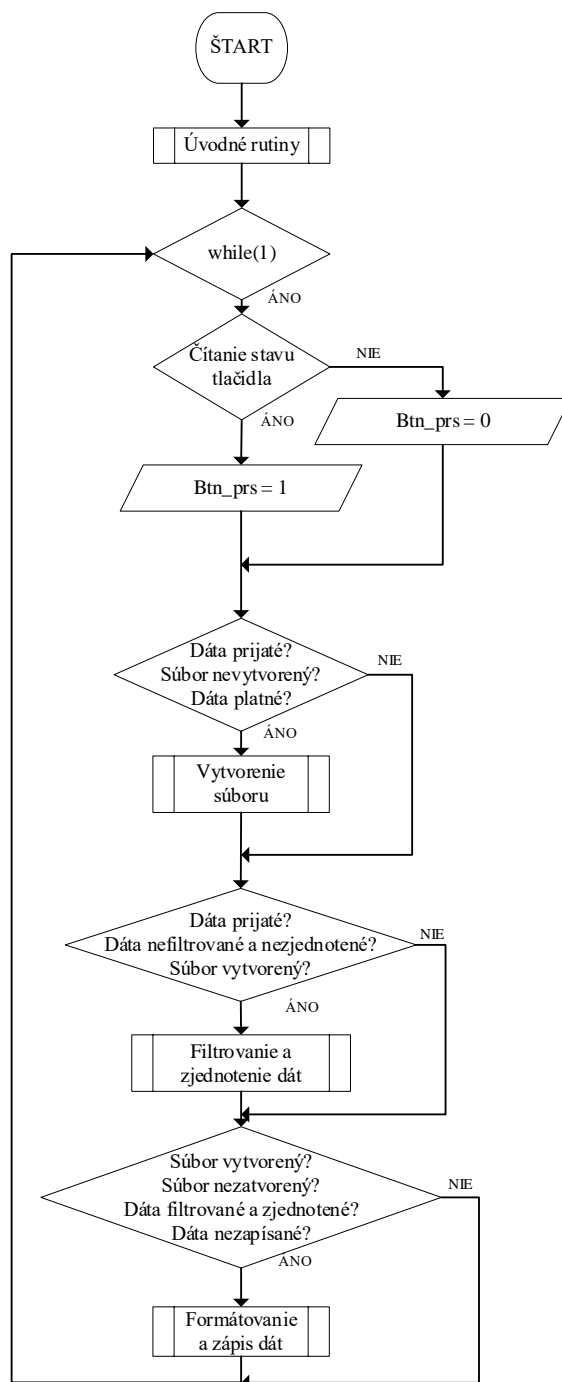
Všetky poznatky tejto podkapitoly zhromaždili informácie, ktoré sú potrebné pre vytvorenie riadiaceho softvéru. Nastavenie periférii je dôležité pre získanie čo najlepších výsledkov zo zariadenia a potvrdenie teoretických predpokladov.

### 3.5 Riadiaci program

Riadiaci program spája všetky použité periférie do jedného koherentného zariadenia, ktoré v tomto prípade je aj vhodným prostriedkom pre pripájanie ďalších dodatočných periférii a skúšanie nového softvéru. Ten môže zlepšiť parametre systému, zvýšiť spoľahlivosť alebo výdrž. Riadiaci program je písaný v jazyku C, pretože je to najčastejšie používaný jazyk pre mikrokontroléry, zvlášť pre platformu STM32. Ako vývojové prostredie bol použitý softvér od výrobcu. Program CubeMX, ktorý slúži na nastavenie hardvéru mikrokontroléru, nastavenia hodinových signálov a syntéza ich frekvencií a CubeIDE, ktorý slúži na písanie kódu, kompiláciu a nahrávanie do mikrokontrolérov, sledovanie chodu programu a systémových premenných.

Riadiaci program sa skladá zo súboru podprogramov, ktoré sa aktivujú podmienenými skokmi, ktoré sú vo vývojovom diagrame na obrázku 3.14. Ak je riadiaca

premenná pre daný podprogram aktivovaná, tak sa podprogram vykoná a na svojom konci premennú deaktivuje, takže sa v ďalšom behu nebude opakovať, kým ju zase nejaký iný podprogram neaktivuje.

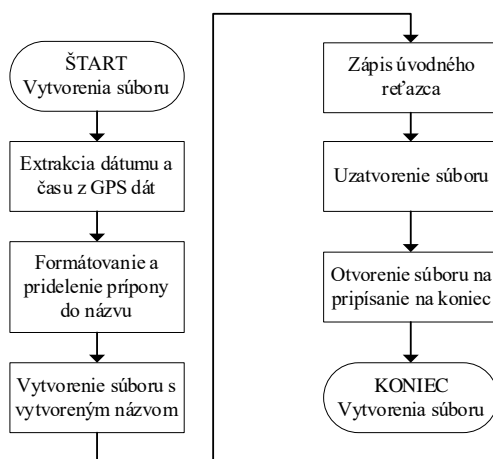


Obrázok 3.14 Vývojový diagram hlavného programu main s podmienkami skoku do podprogramov

Je to prístup, ktorý nevyžaduje používať funkcie jazyka C a teda ani odovzdávanie premenných funkciám. Všetky sú zoradené v tele hlavne funkcie main. Táto štruktúra je

prehľadná, pokiaľ program nie je príliš veľký. Výhodou je, že nie je potreba odovzdávať premenné funkciám cez pointer. Nemá to vplyv na výkon programu, pretože jeho rýchlosť nezávisí na tom, či sú algoritmy v samostatných funkciách alebo zoradené v main a aktivované riadiacimi premennými. Jediné funkcie, ktoré sú mimo tela hlavného programu sú tie, ktoré sú vyvolané externým podnetom. Je to napríklad dokončenie prijímania znakov na sériovej zbernici UART. Predtým, než sa program dostane do hlavného cyklu while sa vykonávajú úvodné rutiny, ktoré aktivujú periférie a nastavujú ich do prevádzkového stavu. Tie budú rozobrané neskôr. Po nastavení periférie program main skáče do hlavného cyklu, ktorý má niekoľko funkcií. Stará sa o to, aby boli dáta prijímané z periférií GNSS modulu a IMU senzoru boli spracovávané v matematických filtroch a zlúčené do korigovaných dát. Tie boli správne naformátované a uložené na pamäťovú kartu. Taktiež sa stará o to, aby stav indikačných LED bol aktualizovaný podľa aktivity procesoru a aby stav tlačidla bol snímaný a podľa neho sa menilo správanie kódu. Logika kódu je taká, že súbor, ktorý sa vytvorí na pamäťovej karte má názov, v ktorom je dátum a čas začiatku merania. Tento dátum a čas je extrahovaný z informácií z GNSS modulu, ktorý má tieto informácie zo satelitov, ktorých signál prijíma. Je teda jasné, že záznam dát na pamäťovú kartu nezačne skôr, než GNSS modul má tieto informácie k dispozícii. Pre to musí mať GNSS modul aspoň čiastočne nezakrytý výhľad na voľnú oblohu.

Na získanie dátumu a času síce stačí jediný prijatý signál zo satelitu, ale záznam sa kvôli ochrane voči falošným, teda prázdny záznamom, nezačne dovtedy, než sú prijímané údaje o polohe, ako je vidieť na vývojovom diagrame na obrázku 3.15.

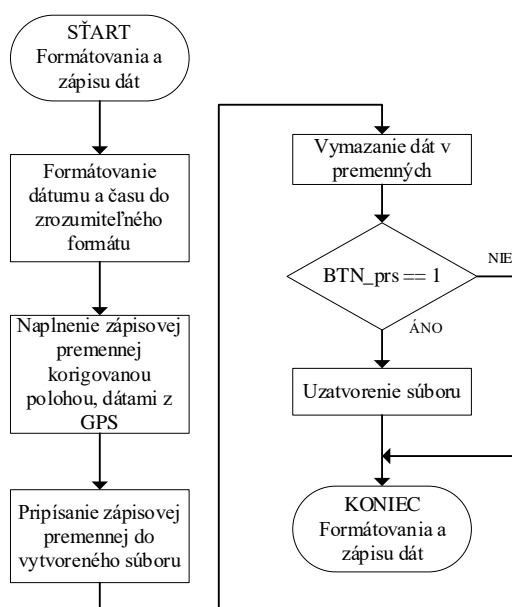


Obrázok 3.15 Vývojový diagram rutiny, ktorá z platného dátumu a času vytvorí názov súboru, vytvorí súbor a naplní ho počiatočnými informáciami

Keď je vytvorený názov súboru, ktorý odpovedá dátumu a času a je správne naformátovaný, teda dátum a čas sú oddelené podtržníkom, je pridelená súboru prípona, ktorá definuje, ako sú v súbore dáta usporiadané a akým programom majú byť otvárané. V počiatočných sa kvôli jednoduchosti dát a možnosti rýchlej kontroly súbor zapisoval

do textového súboru s príponou \*.txt. Súbor vo finálnej verzii programu majú príponu \*.csv, ktorá v preklade znamená hodnoty oddelené čiarkou.

Tieto súbory môžu byť importované do tabuľkových editorov, ktoré využijú spomínané čiarky a dáta rozdelia do buniek v stĺpcoch. Aj keď dnes už tabuľkové editory umožňujú použiť aj iný znak ako riadiaci a oddelujúci jednotlivé dáta, čiarka je stále najbežnejším znakom a je štandardom. Po vygenerovaní názvu sa príkazom `f_open` s príznakom `FA_CREATE_ALWAYS` vytvorí súbor s vygenerovaným názvom. Aby ale bolo možné do tohto súboru postupne pripisovať a jeho obsah nebol nahradený novým pri každom zápise, je nutné súbor zatvoriť a znovu otvoriť, ale tentokrát už s príznakom `FA_OPEN_APPEND`. Týmto príkazom podprogram končí a súbor je pripravený na zápis dát. S vytvoreným súborom je možné pokračovať v ďalších podprogramoch. Podprogram, ktorý počíta filtráciu sa skladá z kódu, ktorý je voľne šíriteľný online. Matematické rovnice, ktoré popisujú tieto filtre sú príliš zložité na vysvetlenie v úplnosti, preto boli vysvetlené len schematicky a principiálne. Podobne aj kód, ktorý by realizoval matematické rovnice sa svojou zložitosťou vymykajú záberu tejto práce a preto budú použité ako zásuvný modul, ktorý je nepriehľadný. Na svojich vstupoch prijíma dáta z GNSS modulu a IMU a na výstupe vracia filtrované a zjednotené dáta o polohe.



Obrázok 3.16 Vývojový diagram podprogramu pre generovanie záznamu polohy a zápis do súboru

Po aplikácii matematických filtrov nasleduje zápis do súboru podľa algoritmu z obrázku 3.16. Predtým sa ale musia pripraviť dáta do jednej premennej, ktorá bude do súboru pripísaná. Najprv sa musia previesť dáta o polohe, ktoré sú uložené ako desatinné číslo do formátu znakov ASCII. Formát koordinátov v podobe zemepisnej šírky a dĺžky musia mať špeciálny tvar, aby mohli byť neskôr pri spracovávaní dát v PC vložené do programu na zobrazenie trasy na mape. Kompatibilné formáty ukazujú

Tabuľka 13. GNSS modul vytvára koordináty vo formáte stupňov a desatinným minút, v ktorých musia byť stupne a minúty oddelené medzerou. Podobne aj dátum aj čas sú prepísané do zápisovej premennej vo formáte, ktorý je lepšie čitateľný pre užívateľa. Ďalšie dáta z GNSS modulu sú potom poskladané do zápisovej premennej, oddelené čiarkami. Na konci sú zapísané znaky na zakončenie riadku a začatie nového.

Tabuľka 13 Zoznam najbežnejších formátov geografických súradníc – prevzaté z [50]

Formát geografických súradníc	Popis
DDD° MM' SS.S"	Stupne, minúty a sekundy (najbežnejší formát pre orientovanie sa v mape)
DDD° MM.MMM'	Stupne a desatinné minúty (najbežnejší formát v elektronickej navigácii)
DDD.DDDDD°	Desatinné stupne (najbežnejší formát v počítačových mapových systémoch)

Ak je potrebné začať zápis do nového súboru, je možné reštartovať mikrokontrolér tlačidlom na vývojovej platforme NUCLEO. Vtedy sa zopakujú všetky úvodné rutiny, aby sa zaistilo, že periférie stále pracujú v predpokladaných režimoch, ako je v diagrame na obrázku 3.17.

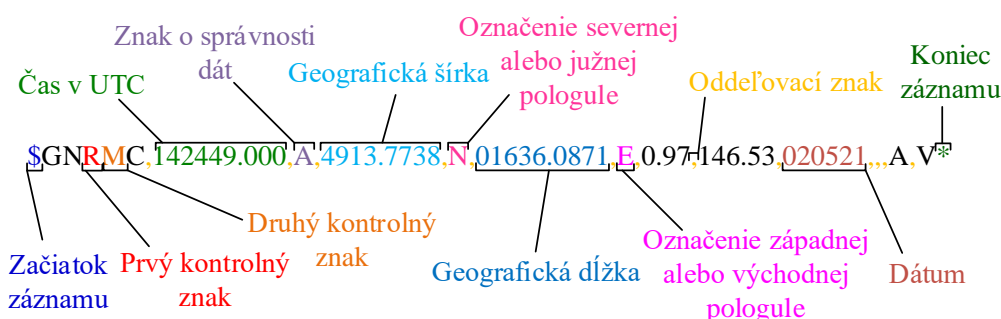


Obrázok 3.17 Vývojový diagram úvodných rutín na nastavenie periférii

Na začiatok sa musia do periférii GNSS a IMU odoslať konfiguračné dáta. GNSS modul sa nastaví na prijímanie z troch navigačných služieb, nastaví sa rýchlejší Baud rate sériového portu a ďalšie. Potom je užívateľ upozornení blikaním LED diód,

že má zariadenie položiť na plochu a nechať v pokoji na niekoľko sekúnd, kým sa zmerajú výstupy z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru a zmerané dáta sa spolu s ostatnými nastaveniami nahrávajú do registrov pre offset. Vďaka tomu bude IMU dávať hodnoty, ktoré sú vzťahnuté k polohe, v ktorej bolo kalibrované. Nakoniec je pripojená pamäťová karta, aby bola pripravená na ďalšie použitie a aktivuje sa prerušenie portu UART, aby sa po prijatí každého znaku aktivovala rutina prerušenia a bol správne roztriedený alebo použitý ako riadiaci znak.

Triedenie znakov funguje na základe toho, že poradie dát v jednotlivých NMEA vetách je konštantné, ale ich dĺžka nie. Príklad jednej správy je na obrázku 3.18. Začiatok záznamu je po prijatí znaku \$, ktorý je prvým znakom každej vety. Ak je záznam spustený, začína sa hľadanie správneho reťazca označujúceho každú vetu. Na ich definitívne rozlíšenie stačia dva po sebe idúce znaky.

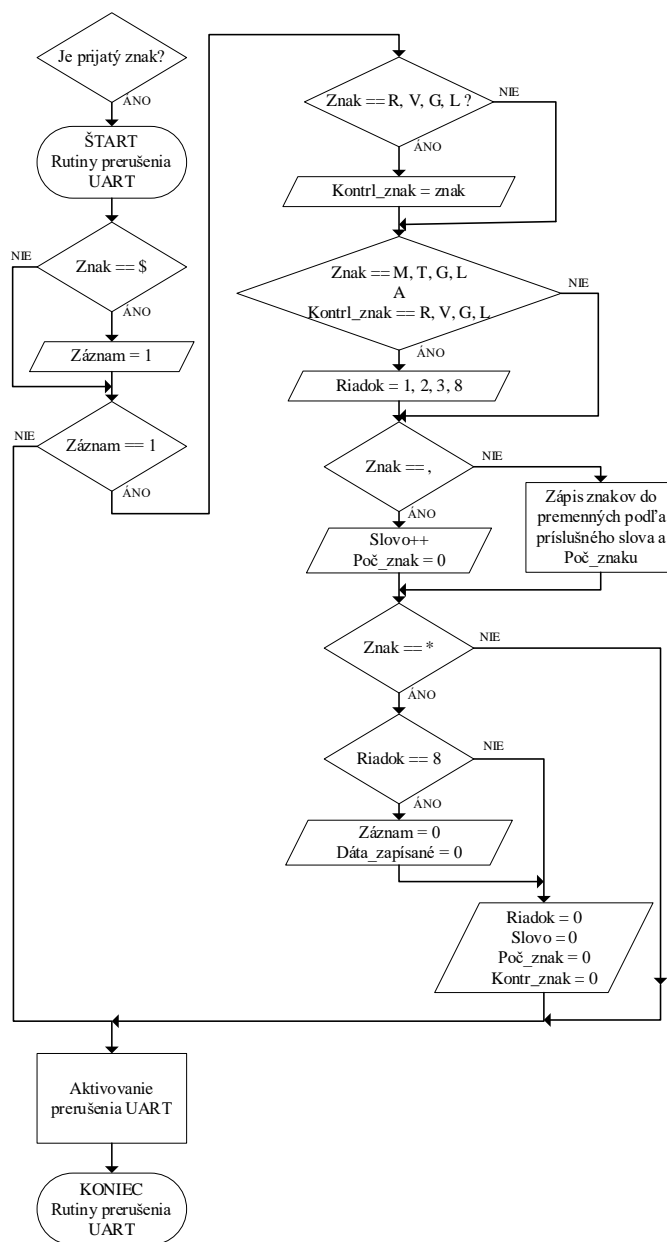


Obrázok 3.18 Rozdeľované dáta v správe xxRMC do jednotlivých premenných

Po prijatí prvého potrebného znaku sa čaká, či príde aj druhý a ak áno, do premennej, ktorá označuje aktuálnu vetu sa nahrá jej poradové číslo. Ďalší znak, ktorý sa sleduje, je čiarka. Ak je prijatý tento znak, tak sa navýši počítadlo tzv. slov, alebo buniek dát, ktoré sú v jednotlivých vetách a taktiež sa zmaže počítadlo znakov, ktorým sa riadi postupný zápis jednotlivých znakov. Ten je navýšený o 1, keď sa zapíše znak, ktorý spĺňa podmienky dátových polí, ktoré sú snímané. Je nutné, aby sedeli poradové čísla vety a slova. Posledným riadiacim znakom je \* a ňou sa reštartujú viaceré premenné. Nulujú sa počítadlá viet a slov, počítadlo znakov aj kontrolný znak na detekciu viet. Ak sa dokonca jedná o poslednú prijatú vetu, ktorá je vždy rovnaká, tak sa okrem spomenutých premenných nastaví, že je zakončený záznam, čo aktivuje podprogramy v hlavnom tele programu pri ďalšom behu. Tiež sa nastaví premenná, ktorá ukazuje, že boli prijaté dáta a podprogram, ktorý tieto ďalej spracováva sa spustil, ale len raz. Na konci tohto podprogramu sa premenná zase reštartuje ako je na vývojovom diagrame z obrázku 3.19.

Pri návrhu triediaceho algoritmu bolo zvažovaných niekoľko možností, ako ho realizovať. V prvých návrhoch sa zvažovalo, že počas prijímania jednotlivých znakov sa budú zapisovať do pomerne veľkého dvojrozmerného poľa len so základným rozdelením na jednotlivé vety do riadkov. Následne po prijatí celej správy by sa roztriedili

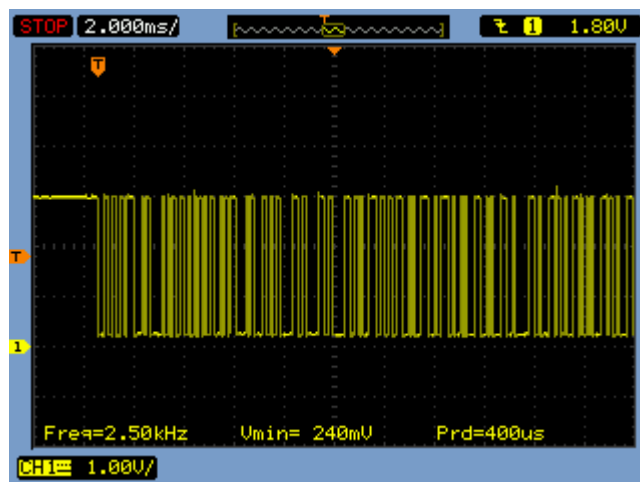
do príslušných premenných alebo by sa netriedili vôbec a podprogramy by si z nich museli inteligentne vyberať správne dáta. Tento systém sa nakoniec nepoužil, pretože je náročný na pamäť RAM, kde by dáta boli v pamäti uložené dvakrát. Taktiež by sa spotrebovalo viac procesorového času na následné prerozdeľovanie. Pri neprerozdeľovaní by zase museli byť podprogramy zložitejšie a horšie by sa v nich dalo zorientovať pri prípadnom hľadaní chyby. Zvolený prístup je najrýchlejší a zaberá najmenej miesta v operačnej pamäti.



Obrázok 3.19 Vývojový diagram rutiny na triedenie znakov prichádzajúcich po linke UART

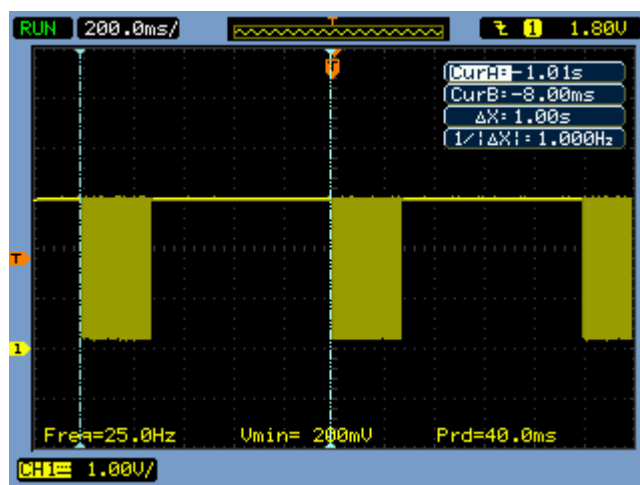
Pri overovaní funkčnosti sériovej zbernice UART sa používal dvojkanálový osciloskop na vizualizáciu dát, ktoré sú vysielané z GNSS modulu. Začiatok tohto dlhého

záznamu je na obrázku 3.20. Záznam bitov je veľmi dlhý, pretože modul odosiela dáta bez prestávky až do konca celej správy, takže nie je vidieť prestávka medzi každým odoslaným bajtom. V tomto prípade sa jeden bajt posiela ako 8 dátových bitov a jeden STOP bit na konci každého bajtu. [45]



Obrázok 3.20 Dátový tok po sériovej linke UART

Pri zvolení väčšej časovej základne je vidieť na obrázku 3.21, že GNSS modul vysiela správy pravidelne každú sekundu. [45]

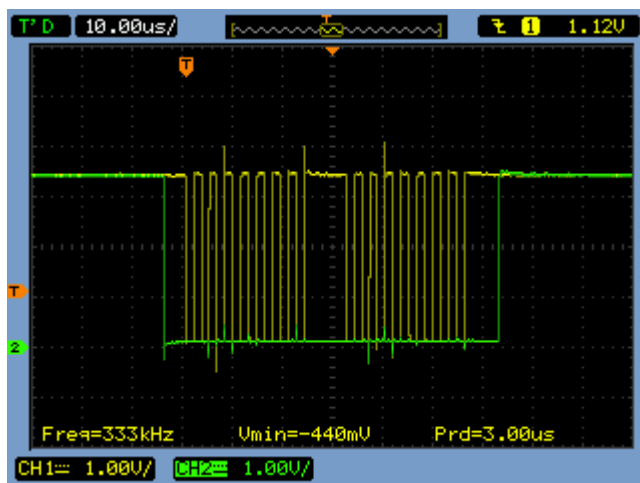


Obrázok 3.21 Vysielanie dát po zbernici UART pravidelne každú sekundu

Vďaka použitiu osciloskopu bolo možné overiť funkčnosť GNSS modulu predtým, než bolo naprogramované zachytávanie dát zo sériovej linky. Ten totiž vysiela dáta bez ohľadu to, či sú prijímané a nie je potrebné posielať čipu výzvu na vysielenie dát. Pri module IMU to ale tak nebolo. Tento modul komunikuje po sériovej zbernici SPI, ktorá je prispôbená na pripojenie viacerých zariadení naraz. Jednotlivé podradené zariadenia nemôžu svojvoľne vysielať, aby náhodou nenastala kolízia. Zariadenie musí byť oslovené nadriadeným zariadením, aby mu vydal požadované dáta. Pri skúškach

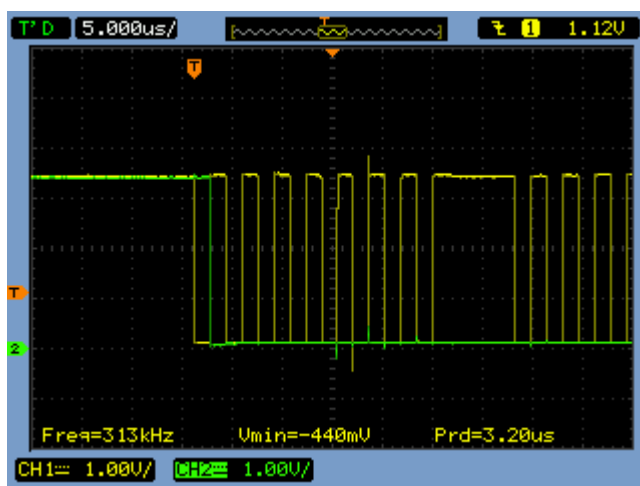


hardvéru bolo zistené, že integrovaný obvod BMX160 neodovzdáva informácie po sériovej zbernici SPI. Osciloskopom sa zisťovalo, či časovania a dáta, ktoré sú odosielané do zariadenia sú validné a zariadenie by bolo schopné ich rozpoznať. Na obrázku 3.22 je vidieť, že signály pre výber destinácie správy funguje správne a hodinový signál sa aktivuje po výbere čipu. Na obrázku 3.23 je hodinový signál spolu s dátovým vstupom. [43]



Obrázok 3.22 Zachytená obrazovka osciloskopu, ktorá ukazuje hodinový signál (žltá čiara) a signál výberu čipu (zelená čiara)

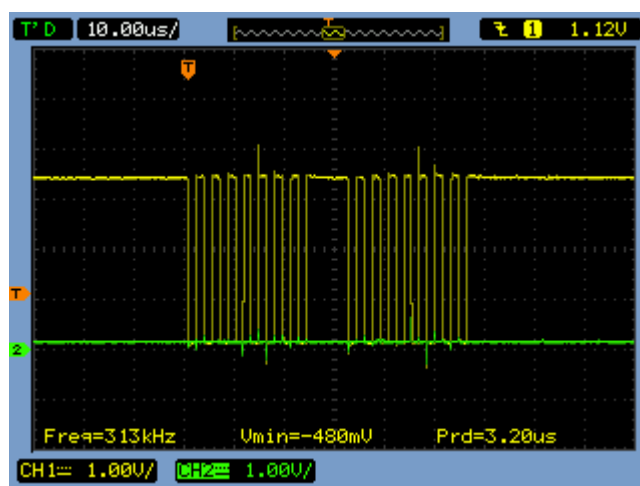
Na dátový vstup sú posielaná dáta 0b10000000, čo znamená čítanie z adresy 0, na ktorej by mal byť uložený údaj o označení čipu. Časovanie hodinového signálu voči dátovému vstupu je korektné a odosielaná adresa je správna. [43]



Obrázok 3.23 Zachytená obrazovka osciloskopu, ktorá ukazuje hodinový signál (žltá čiara) a dátový vstup (zelená čiara)

Na obrázku 3.24 je zase hodinový signál a dátový výstup BMX160, ktorý je permanentne v log. 0, aj keď by v druhej sekcii hodinového signálu vysielal dáta.

Tento jav sa nedal vysvetliť prípadnou chybou kombinácie a vzišlo podozrenie na vadný čip. Pre test tejto teórie sa na rovnakú zbernicu pripojil iný integrovaný obvod, ktorý komunikuje po zbernici SPI ako BMX160 a priradil sa mu iný signál výberu čipu. Komunikácia vyzerala identicky, nebol spozorovaný žiaden rozdiel. Tento záver smeroval k tomu, že chyba bude vážnejšia a bude mať spojitosť so samotnou zbernicou. Pripojovaním pull-up odporu a následnou kontrolou multimetrom v režime continuity sa zistilo, že dátový výstup z BMX160 je skratovaný na zem.

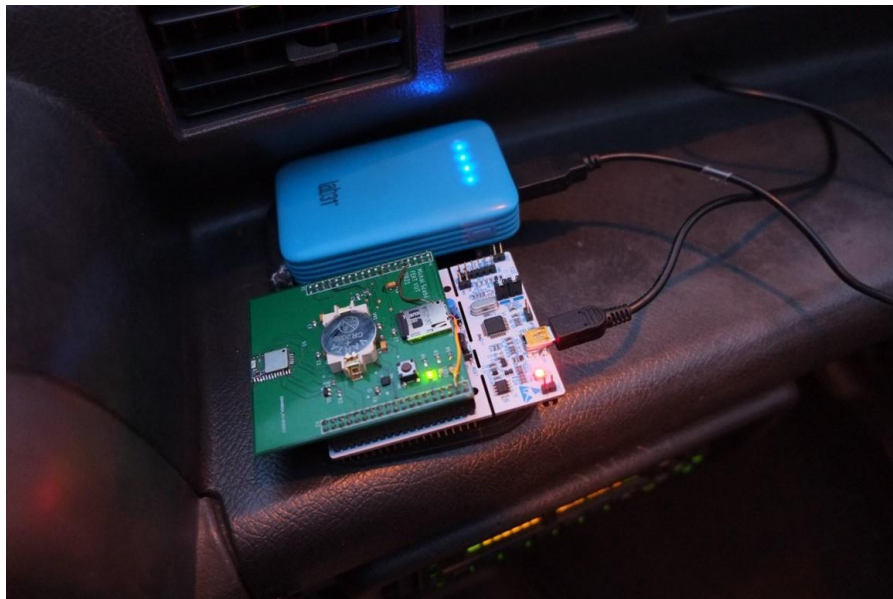


Obrázok 3.24 Zachytená obrazovka osciloskopu, ktorá ukazuje hodinový signál (žltá čiara) a dátový výstup (zelená čiara), ktorý je neustále v log. 0

To mohlo poškodiť všetky obvody, ktoré pri pokuse o vysielanie dát mali skrat na zem vždy, keď vysielali log. 1. Testovací integrovaný obvod bolo vďaka testovacím pinom na doske Nucleo možné pripojiť na inú zbernicu SPI. Tá by za normálnych okolností bola obsadená zbernicou SDMMC. Ani na tejto zbernici zariadenie nereagovalo a záver je taký, že aj toto zariadenie, aj BMX160 boli nenávratne poškodené skratom na ich dátovom výstupe. Táto chyba vznikla pri spájkovaní čipu na dosku. Bolo nutné vymeniť čip, aby bolo možné dostať zariadenie do plnej prevádzky. To ale skomplikovalo celosvetový nedostatok kremíkových čipov, ktorý sa v roku 2021 rozšíril z grafických kariet a procesorov do PC aj na periférne jednoúčelové integrované obvody. V súčasnosti nie je možné zakúpiť obvod BMX160 u žiadneho predajcu, ktorý ho predával v minulosti. Predajca Mouser, u ktorého bol zakúpený už poškodený kus uvádza, že dodacia lehota pre tieto integrované obvody je 30 týždňov. Preto nebolo možné dokončiť finálne zariadenie pre testovacie účely. Kód, ktorý prijíma a spracováva prijaté dáta je ale plne pripravený prijímať dáta od IMU a pracovať s nimi. Bez dát z IMU je systém schopný naďalej fungovať, ale bude dosahovať len presnosti zameriavania GNSS modulu. Takže ak bude zmena polohy menšia než udávaná presnosť, teda 2,5 m, tak sa môžu vyskytovať nepresnosti alebo šum signálu.

## 4. PRAKTICKÉ SKÚŠKY

Praktické skúšky slúžia na overenie funkcie zariadenia a zistenia jeho výsledných parametrov. Tieto skúšky boli navrhnuté tak, aby zredukovali čo najviac premenných, ktoré by mohli skresľovať výsledky. Keďže sa jedná o zariadenie na sledovanie polohy, je potrebné vykonať statické a aj dynamické testy, ktoré budú prevažne v exteriéroch. Testy v interiéroch nie sú veľmi praktické, pretože aj keď IMU dokáže merať relatívnu zmenu polohy, pokiaľ GNSS modul nezameria absolútnu polohu na planéte, tak skutočná poloha nebude jasná. Statické testy ukážu, aký je šum a drift zariadenia. Dynamické testy zase ukážu okrem zmienených faktorov, aký vplyv má obnovovacia frekvencia zameriavania na celkový záznam. Testy musia zahrňovať širokú škálu podmienok, aby reflektovali reálne situácie, do ktorých sa môže zariadenie dostať. Skúšky taktiež musia zahŕňať prípady, kedy je zrýchlenie nulové a zase keď má zrýchlenie nenulovú hodnotu, príklady meraní na obrázkoch 4.1 a 4.2. Dráha, ktorú bude zariadenie opisovať musí mať buď známe parametre, prípadne musí byť jasné, akú cestu vyznačenú na mape kopíruje, aby bolo možné vyhodnotiť nepresnosti. Preto boli zvolené testy, ktoré boli vykonané pri chôdzi a pri jazde autom.



Obrázok 4.1 Zariadenie počas praktických skúšok v aute

Zariadenie ukladá dáta o polohe v podobe, ktorá je kompatibilná s bežnou praxou, ako je už spomenuté v minulej kapitole. Tie sú po importovaní do programu MS Excel zoradené v stĺpci pod seba, pričom v jednej bunke sú dáta o geografickej šírke aj dĺžke oddelené bodkočiarkou. Tento znak bol vybraný preto, lebo je to druhý najbežnejšie používaný riadiaci znak na oddelovanie blokov dát a je možné ho zvoliť v nasledujúcom programe, ktorý pracuje s dátami o polohe. Aby sa tieto dáta mohli exportovať a zobrazit ako dráha na mape, musia sa označiť v programe MS Excel a prekopírovať do programu,

ktorý sa nazýva GPSPRUNE. Je to aplikácia napísaná pre prostredie Java a jeho zvláštnou vlastnosťou je, že je doňho možné importovať dáta do textového poľa a nastaviť znak, ktorý oddeľuje geografickú šírku a dĺžku. Tieto dáta sú spracované, zobrazené na mape s pridanými vektorovými šípkami, ktoré určujú pohyb podľa poradia vložených dát o polohe.



Obrázok 4.2 Praktické skúšky zariadenia v reálnych podmienkach

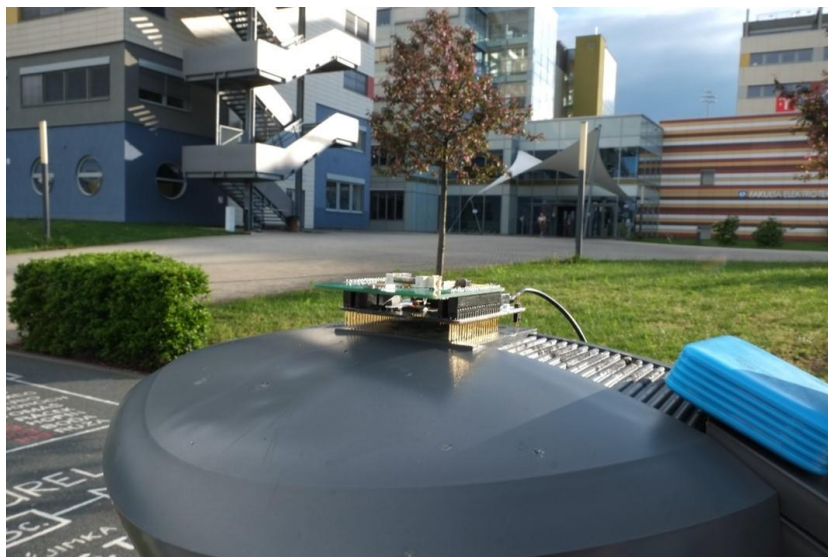
Túto dráhu je možné exportovať vo formátoch, ktoré sú importovateľné do bežných mapových systémov, ako sú Google Earth vo formáte \*.KML alebo Mapy.cz vo formáte \*.GPX. Rýchlosť pohybu v danom momente by mala byť merateľná aj priamo z dát od GNSS modulu, ale z dôvodu neznámej chyby dáta v km/h neboli zaznamenané. To nie je veľká strata, keďže je známe, že dáta sú zaznamenané každú sekundu. Ak sa zmeria vzdialenosť dvoch bodov v metroch, tak údaj o rýchlosti medzi týmito dvoma bodmi je identická hodnota, ale v metroch za sekundu. Vzhľadom na hodnoty rýchlosti, ktoré vysielalo zariadenie je táto metóda aj presnejšia, pretože rýchlosť meraná zariadením občas vykazovala abnormalitu a nebola spoľahlivá.

## 4.1 Testy pri chôdzi

Testy pri chôdzi zahŕňajú sériu testov, ktoré sú statické, alebo pri nízkych rýchlostiach v jednotkách km/h. Pri takýchto testoch budú vždy hodnoty zrýchlenia malé a preto budú zanedbané. Statické testy sú vytvorené tak, že zariadenie je umiestnené na známej pozícii v priestore, ktorá je neskôr dohľadateľná na mape a je zaznamenávaná jeho poloha. Na fotografii z obrázku 4.3 je vidieť, ako bolo zariadenie položené pred vstupom od budovy T12 FEKT VUT. Meranie trvalo približne 6 minút a výsledky sú na obrázku

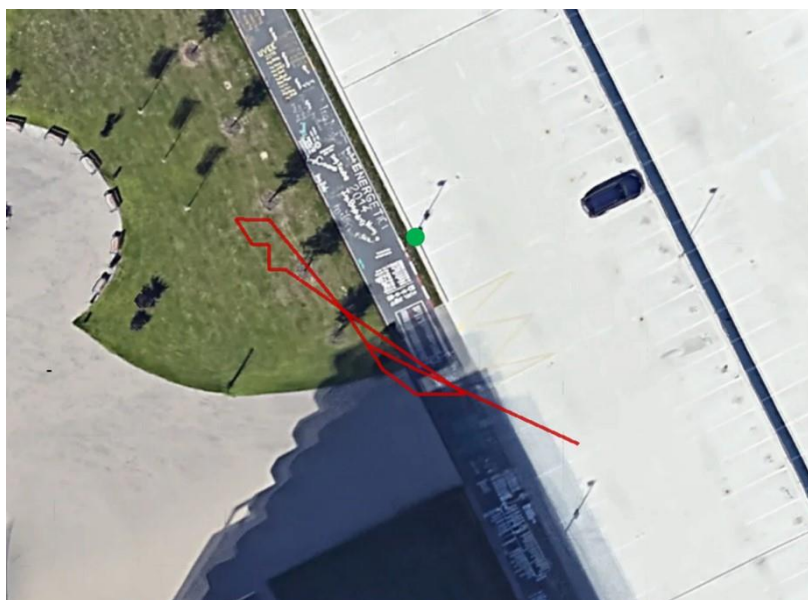


4.4. Je tu vidieť veľký rozptyl hodnôt, ktoré sa pohybujú okolo reálneho bodu vo vzdialenosti približne 20 m. Je ale treba dívať sa na dáta analyticky.



Obrázok 4.3 Umiestnenie zariadenia pri prvom meraní stacionárnej polohy

Zariadenie bolo zapnuté tesne pred začiatkom záznamu. Ak sa odfiltruje prvá minúta a pol záznamov, tak je vidieť, že sú zaznamenané už len dva body vo zvyšný čas celého merania, ktoré sú bližšie skutočnej polohe. Tie sú vidieť na obrázku 4.5.



Obrázok 4.4 Zaznamenaná poloha zariadenia počas celej doby prvého stacionárneho merania, zmeraná poloha vyznačená červenou čiarou a skutočná poloha zeleným kruhom

Všetky ďalšie stacionárne polohy, ktoré boli merané nasledovali hneď po prvom meraní a medzi nimi nebolo zariadenie vypnuté od napájania. Na fotografiách z obrázku

4.6 je vidieť, že sa počas celej doby merania poloha nezmenila a nezáležalo na dĺžke merania. Z toho teda vyplývajú dve veci.



Obrázok 4.5 Zaznamenaná poloha zariadenia po odfiltrovaní doby ustálenia prvého stacionárneho merania, zmeraná poloha vyznačená červenou čiarou a skutočná poloha zeleným kruhom

Po tzv. studenom štarte zariadenia, kedy je nahrávanie spustené hneď po pripojení napájania, je poloha nepresná a potrebuje určitý čas na to, aby sa ustálila. Druhý poznatok je, že nepresnosť merania stacionárneho bodu je možné merať až po tejto dobe ustálenia.



Obrázok 4.6 Zaznamenaná poloha zariadenia na niekoľkých stacionárnych miestach, zmeraná poloha vyznačená žltým špendlíkom a skutočná poloha zeleným kruhom

Ďalšie poznatky z týchto meraní vyplývajú z dát samotných. Ďalšie 3 merania stacionárnych polôh ukazujú určitý rozptyl pri meraní týchto polôh. V poradí druhé

meranie, ktoré je v ľavej časti je veľmi presné a od skutočnej polohy vzdialené približne meter. Tretie meranie, v strednej časti obrázku, vykazuje pomerne veľkú odchýlku, približne 5 metrov a posledný bod v pravej časti obrázku je skutočnej polohe o niečo bližšie. Tieto nepresnosti sú spôsobené dvoma faktormi. Prvým je nepresnosť polohovania systémov GNSS, ktorá je udávaná ako menšia než 2,5 metra. To by vysvetľovalo druhé a štvrté meranie, ale nie tretie, kde je odchýlka väčšia. Určitý vplyv má blízkosť k budove, ktorá tieni výhľad na dostupné satelity a znižuje tak presnosť zamerania. Dôvodom ale bude ďalší faktor, ktorý hrá rolu, a tým je nedostatočná presnosť súradnicového systému, ktorý sa používa pre udávanie polohy. Udávaná presnosť, ktorou je vyjadrovaná poloha modulom Quectel L96 je približne jeden meter, pričom sa mierne mení v závislosti na vzdialenosti od rovníku. Ak sa tieto faktory sčítajú do maximálnej možnej chyby, je možné zdôvodniť nameranú odchýlku pri meraní tretej stacionárnej polohy. Na tieto nepresnosti je treba pamätať pri analýze ďalších výsledkov. [51]

Ďalšie testy zahŕňajú chôdzu. Aby sa zabezpečilo, že rýchlosť bude konštantná, pohyb bol navrhnutý tak, aby nebolo nutné meniť rýchlosť pri chôdzi kvôli zmenám terénu alebo zmenám smeru pohybu. Preto sa navrhol test, pri ktorom sa chôdzou opisuje kružnica so známym polomerom okolo známeho stredu na rovnom povrchu. Tento experiment sa uskutočnil na dostatočne veľkej parkovacej ploche, ako je vidieť na obrázku 4.7.



Obrázok 4.7 Nastavenie bodu stredu kružnice a vyznačenie polomerov 10 a 20 m na mape

Vďaka tomu sa môže vyhodnotiť presnosť snímania polohy. Pre tento experiment bolo vybrané dostatočne veľké parkovisko, na ktorom je možné obísť kružnicu s polomerom až 20 m. Ako stred bol určený bod, ktorý pretínajú čiary na parkovisku. Vzdialenosť od stredu sa merala vodičom na sieťové napätie, na ktorej boli vyznačené päť metrové vzdialenosti. Na vyznačenom bode asistent drží jeden koniec šnúry a v správnej vzdialenosti je držaná šnúra, ako je vidieť na obrázku 4.8. V rámci testu sa obišlo niekoľko kôl. Je nutné poznamenať, že šnúra sa svojou dĺžkou a hmotnosťou prehýbala, pokiaľ nebola úplne napnutá, čo sa počas chôdze nedopatrením stalo. Na reálne výsledky ale tento fakt nemá vplyv, pretože nepresnosť týmto vzniknutá nie je väčšia než 0,3 m a ďalšie nepresnosti, ktoré boli spomenuté vyššie túto prevyšujú. To

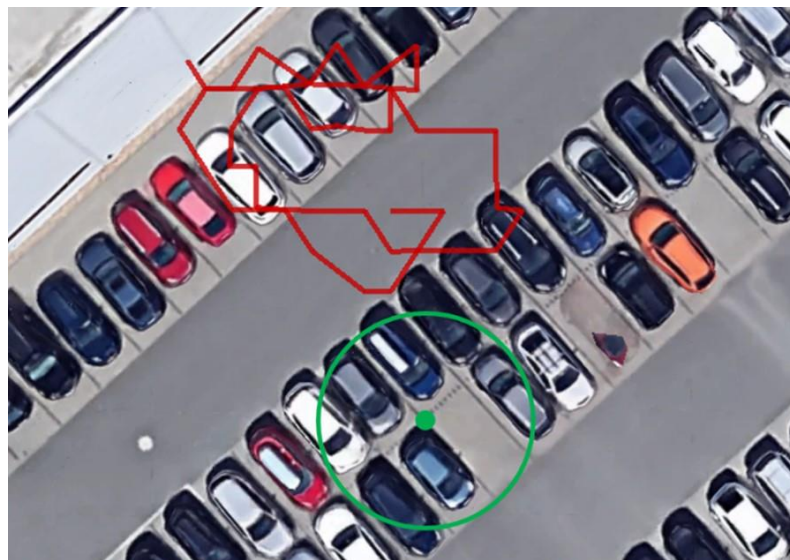


bude vidieť vo výsledkoch. Je treba ešte dodať, že plocha na pokus použitá nie je úplne rovinná, skladá sa z niekoľkých rovín, ktoré vytvárajú spád pre dažďovú vodu. Uhly, ktoré tieto roviny zvierajú sú ale tak malé, že na experiment nemajú vplyv.



Obrázok 4.8 Experiment chôdze po kružnicovej dráhe

Na obrázku 4.9 sú výsledky merania. Malý polomer dráhy spôsobujú krátky čas merania a teda málo zaznamenaných bodov. Okrem toho je jasný drift, ktorý platí pre všetky namerané výsledky.



Obrázok 4.9 Test chôdze po kružnici s polomerom 5 m (zelene) a namerané výsledky (červene)

Je možné, že drift je spôsobený už zmieneným časom, ktorý zariadenie potrebuje k tomu aby sa ustálilo. Pri tejto chybe nemôže pomôcť ani korekcia dátami z IMU,



pretože počiatočný bod bol zameraný nesprávne. Tvar nameranej krivky sa rozhodne blíži tvaru kružnice, ale odchýlky, ktoré vznikli neistotou merania ju pokrývajú. Všetky tieto nepresnosti sa v druhom pokuse s väčším priemerom dráhy zlepšili.



Obrázok 4.10 Test chôdze po kružnici s polomerom 10 m (zelene) a namerané výsledky (červene)

Na obrázku 4.10 sú výsledky testu chôdze po dráhe s priemerom 20 m. Tento test priniesol lepšie výsledky ako test s menším priemerom dráhy. Dôvody boli naznačené vyššie. Dlhšia dráha väčšieho obvodu dáva možnosť zmerať viac bodov za jednu otočku. Toto meranie bolo uskutočnené po prvom meraní s menším priemerom a GNSS modul mal čas lepšie ustáliť základnú polohu. Tvar krivky sa ešte lepšie blíži opísanému tvaru.

Výsledky z testov pri nízkych rýchlostiach sú jednoznačné. Pri stacionárnych meraniach je možné dosiahnuť pomerne vysokej presnosti, pokiaľ sa nechá GNSS modul v pokoji približne prvé 2 minúty od studeného štartu. Pri pohybe rýchlosťami v jednotkách km/h je snímanie problematické. Prispieva k tomu nepresnosť merania GNSS modulu, nepresnosť zápisu polohy a taktiež nesprávna počiatočná poloha. Niektoré z týchto nepresností sú korigovateľné dátami z akcelerometru a gyroskopu, ale pokiaľ nie je správne určená absolútna pozícia na začiatku, tak relatívna zmena polohy nevylepší výsledky dostatočne, pokiaľ je interval merania krátky.

## 4.2 Testy automobilom

Testy automobilom prinášajú dáta o tom, aké dáta dáva zariadenie v prípadoch, že sa pohybuje vyššou rýchlosťou. Je nutné zistiť, či zvýšená rýchlosť má pozitívny alebo negatívny vplyv na výsledky. Môžu sa prejavovať nedostatky spôsobené frekvenciou vysielania dát. Pokusy boli vykonávané na niekoľkých miestach a s viacerými pozorovanými javmi.

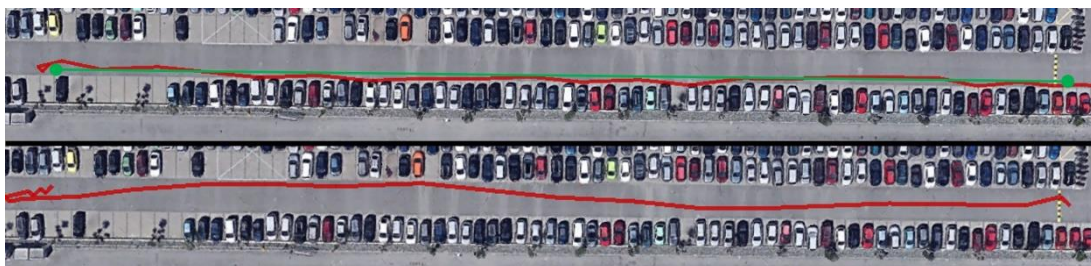
Prvý pokus sa uskutočnil na spomínanom parkovisku a jeho cieľom bolo zistiť, či GNSS modul dokáže správne sledovať polohu auta pohybujúceho sa po priamej dráhe. Auto sa z pokoja akceleruje na rýchlosť približne 35 km/h a po určitej prejdenej dráhe zase zastaví. Kľúčové je, že ľavá strana vozidla sa udržiava čo najbližšie medzi asfaltom a dlažbou, ako je na obrázku 4.11.



Obrázok 4.11 Vozidlo pohybujúce sa na hrane asfaltu po priamočiarej trajektórii

Výsledky sú na obrázku 4.12 hore a sú pomerne presné. Dráha ukazuje priamu stopu bez väčších vychýlení z kurzu. Počiatočný aj koncový bod sa nachádzajú na správnych miestach. Je vidieť, že ak sa zariadenie pohybuje konštantnou nenulovou rýchlosťou po priamej dráhe, tak sa presnosť výrazne zvyšuje a dosahuje najviac jeden meter odchýlky. To napovedá, že snímanie dráhy vozidla na ceste bude mať dobré výsledky. Pri príležitosti voľnej rovnej dráhy sa vyskúšal ešte jeden experiment, ktorý by mal odhaliť vplyv frekvencie záznamu dráhy na výsledky. Na dráhe rovnakej dĺžky automobil znovu akceleroval, tentokrát na rýchlosť 50 km/h. Po dosiahnutí tejto rýchlosti začal automobil robiť slalom medzi virtuálnymi prekážkami tak, že jeho priečny pohyb bol medzi hranami asfaltovej plochy. Zmeny smeru sa vykonávali s maximálnou možnou razanciou. Výsledky sú vidieť v rovnakom obrázku ako predchádzajúci experiment dolu. Dráha, ktorá bola zameraná je mierne zvlnená, než predchádzajúca priamočiara dráha. Rýchle zmeny smeru ale neboli zaznamenané, ako je vidieť na obrázku 4.12 dolu.

Pravdepodobnou príčinou je, že frekvencia záznamu 1 Hz je príliš malá na záznam rýchlych zmien pohybu. Aby boli zaznamenané takto rýchle zmeny pohybu, musel by sa dodržať Shannon–Nyquistov–Kotelnikovov teorém, ktorý hovorí, že vzorkovacia frekvencia musí byť minimálne dvojnásobok frekvencie signálu, v tomto prípade je signálom frekvencia zmeny smeru jazdy.



Obrázok 4.12 Obrázky zobrazujúce dve merania dráhy, meranie priamočiarej dráhy vozidla (hore) s vyznačenými skutočnými bodmi začiatku a konca merania a meranie slalomu na tej istej trati (dolu)

Tu táto podmienka jasne nebola splnená a preto je výsledná krivka nesprávna. Senzor IMU by takéto zmeny vedel zanášať do celkového korigovaného výsledku. Je ale možné, že by rýchlosť zmeny zrýchlenia bola príliš veľká pre základné nastavenie rozsahu akcelerometru tohto senzoru a ani ten by teda neprinášal pravdivé výsledky. Takto rýchle zmeny smeru v takto krátkom čase sa ale v praxi dejú veľmi zriedkavo a preto tento fakt neprináša podstatné skreslenie do výsledných hodnôt. Predtým, než sa ale bude merať poloha prakticky v mestskej aj mimo mestskej doprave, je nutné zmerať aký vplyv má pomalšie, regulárne zakrivenie dráhy pohybu, príkladom je fotografia na obrázku 4.13.



Obrázok 4.13 Jazda automobilom po kružnicovej dráhe

Tieto merania sa mali uskutočniť podobným spôsobom, akým sa meral pohyb chodca po kružnici, teda so šnúrou určujúcou polomer kružnice opisovanej. Problémom je, že automobil má príliš veľkú hybnosť, než aby sa dal korigovať šnúrou bez toho, aby



sa posunul nie pevne ukotvený bod v strede. Taktiež je náročné, ba priam až nemožné, automobilom opisovať kružnicovú dráhu okolo daného stredu. Vnútorne koleso riadenej nápravy by malo byť dotyčnicou kružnicovej dráhy, čo sa komplikovane nastavuje alebo meria len odhadom alebo okom. Bolo potrebné nájsť spôsob, ako vykonávať takýto pohyb kontrolovane a rovnomerne. Najlepším možným riešením bolo aplikovať rovnaký prístup, ktorý bol aplikovaný na jazdu po priamke. Vozidlo by malo udržiavať konštantnú vzdialenosť od hrany, pri ktorej sa drží. Táto hrana ale v tomto prípade musí mať tvar kruhu, napríklad ako kruhový objazd. Takýto kruhový objazd, na ktorom zároveň nie je žiadna premávka sa našiel vo štvrti Kráľovo pole. Je súčasťou novej výstavby a okrem príjazdu jeho cesty nikam nevedú. Jeho priemer je 26 m. Aby sa dala udržať konštantná rýchlosť automobilu, uviedol sa do chodu bez použitia plynu a voľnobežné otáčky určovali konštantnú rýchlosť, ktorá sa dala meniť zmenou rýchlostného stupňa. Týmto spôsobom sa vykonali 4 merania, každé pri inej rýchlosti vozidla na rovnakej dráhe. Výsledky sú na obrázku 4.13. Prvý pokus bol vykonaný rýchlosťou 5 km/h. Je vidieť, že pri takto pomalom pohybe je počet bodov dostatočne veľký na to, aby krivka bola pomerne plynulá, inak povedané, že výsledný mnohoúhelník mal najviac strán. Tento pokus zároveň ukazuje výsledky najviac sa blížiace skutočnej dráhe.



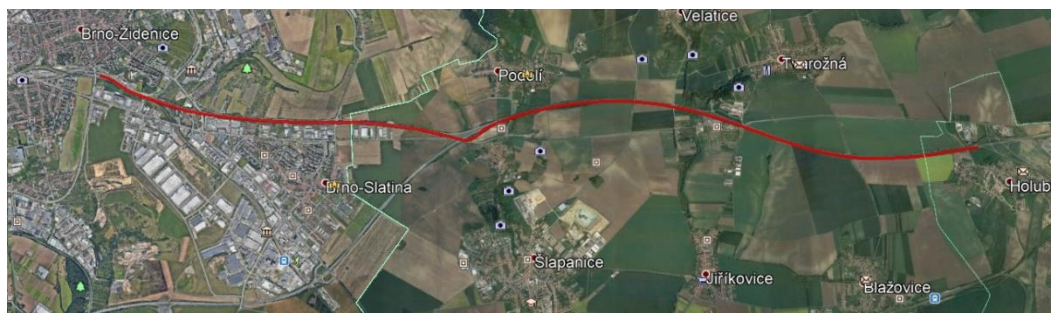
Obrázok 4.14 Dráhy zamerané pri jazde automobilom okolo kruhového objazdu (zelená čiara) záznamy o polohe pri rýchlostiach 5 km/h (vľavo hore), 10 km/h (vpravo hore), 15 km/h (vľavo dole) a 20 km/h (vpravo dole)

Pokusy pri rýchlostiach 10 km/h a 15 km/h vykazujú mierny drift v oboch prípadoch, pričom vždy sa deje v rovnakej časti kružnice. Táto chyba sa dá pripísať vegetácii, ktorá v zakrýva časť výhľadu na oblohu v kvadrante kružnice, kde dochádza k najväčšej odchýlke. So zvyšujúcou sa rýchlosťou je vidieť, že sa počet bodov zaznamenaných

za jeden okruh zmenšuje. Celkovo je ale GNSS trasovanie dráhy presné a pri asistencii IMU by bola dráha úplne presná. Po skúsenostiach s vyššími rýchlosťami bolo nutné zistiť, či modul nemá problémy trasovať pohyb v rýchlostiach o rád vyšších. Kvôli tomu sa vozidlo presunulo na diaľnicu, aby sa zistila presnosť v rýchlostiach nad 100 km/h. Záznam jazdy je na obrázku 4.15. Z obrázku je jasné, že trasovanie je veľmi presné napriek vysokým rýchlostiam. Odchýlka je najviac 2 metre v miestach, kde trasa menila smer a GNSS modul nie úplne presne zachytil tvar krivky. Tento jav bude lepšie demonštrovaný v praktickej skúške. Maximálna dosiahnutá rýchlosť sa spočíta ako rozdiel vzdialenosti dvoch bodov v metroch, pričom čas medzi jednotlivými záznamami je jedna sekunda. Potom sa údaj z m/s prevedie na km/h. Na obrázku 4.16 je jeden z týchto úsekov. Vzdialenosť medzi dvoma úsekmi je 0,039 km, teda 39 metrov. Keď sa hodnoty vložia do rovnice

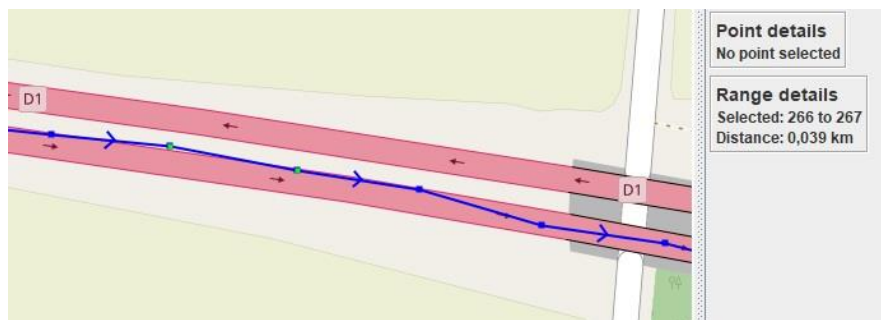
$$v \left[ \frac{km}{h} \right] = v \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot 3,6 = 39 \cdot 3,6 = 140,4 \doteq 140 \frac{km}{h} \quad (4.1)$$

získa sa rýchlosť približne 140 km/h. Záverom je, že zvýšená rýchlosť nijak neznižuje presnosť trasovania, ba naopak by sa dalo povedať, že je prospešná.



Obrázok 4.15 Trasa rýchlostnej cesty a diaľnice, na ktorej sa skúšali vplyvy vysokej rýchlosti na trasovanie

Výhoda vysokej rýchlosti je aj v tom, že prekážky, ktoré zakrývajú výhľad na oblohu nemajú taký vplyv na zameranie, pretože sa skracuje doba, kedy blokujú signál.



Obrázok 4.16 Úsek trasy, na ktorom je spočítaná dosiahnutá rýchlosť 140 km/h

Vplyv na zameriavanie je najlepšie pozorovateľný v poslednej praktickej skúške. V tej sa prešla trasa Brnenského mestského okruhu. Táto trasa zahŕňa 3 tunely,



niekoľko mostov ponad cestu, zákruty tiahle aj šikany a rýchlosti od 0 až po 80 km/h. Zaznamenaná trasa je na obrázku 4.17. Už na prvý pohľad je vidieť, že zaznamenaná trasa veľmi dobre odpovedá skutočnej trase.



Obrázok 4.17 Trasa nameraná na Brnenskom mestskom okruhu

Pri vstupe do tunelu je pochopiteľne tienený každý rádiový signál vrátane satelitného navádzania. Po vystúpení z tunelu je ale možné znovu zameriavať a do 100 metrov od ústia tunelu je poloha znovu zameraná a modul pokračuje v korektnom trasovaní, ako je vidieť na obrázku 4.18.



Obrázok 4.18 Obnovenie trasovania po výstupe z Královopolského tunelu

Na tomto obrázku je aj vidieť, že pravdepodobná zotrvačnosť GNSS senzoru spôsobila, že tiahla zákruta za týmto tunelom nie je správne zameraná. Pri asistencii IMU modulu by boli tieto drobné nepresnosti odfiltrované. Podobne aj pohyb v tuneli by bol relatívne dobre doplnený týmto senzorom. Podobná situácia nastala



aj pri odbočení smerom na Židenice, mapa s trasou je obrázku 4.19. Vtedy bol signál prerušený železničným mostom.



Obrázok 4.19 Prerušenie signálu mostom a efekt zotrvačnosti GNSS modulu

Je vidieť, že aj keď je signál už prerušený, teda že prijímač je už v rádiovom tieni, tak zameriavanie ďalej pokračuje rovnakým smerom, v ktorom bola zaznamenaná posledná platná hodnota. Tento efekt sa nemôže uplatňovať v prípadoch, kedy je rýchlosť príliš nízka alebo polomer otáčania príliš malý. Kombináciu faktorov sa prejavuje na dráhe, ktorá je na obrázku 4.20.



Obrázok 4.20 Kombinácia faktorov prechodnej straty signálu a malého polomeru otáčania dráhy

Prechod po železničným mostom medzi Zvonařkou a Poříčím je pomerne ostrá zákruta, ktorú treba prechádzať zníženou rýchlosťou. Tu sa skladá dočasná strata signálu, resp. redukcia počtu viditeľných satelitov, čo vedie ku strate spoľahlivého trasovania. Zmena smeru zase znemožňuje zotrvačne pokračovať GNSS modulu odhadovať trasu v tejto dobe. Preto má trasa po naviazaní na predchádzajúci smer pomerne veľkú chybu

a trvá pomerne nemalú prejdenú vzdialenosť s dostatočným signálom, 200 – 300 m, než sa chyba zredukuje na predchádzajúcu úroveň.

### **4.3 Vyhodnotenie výsledkov**

Dáta, ktoré boli namerané počas niekoľkých pokusov dobre reprezentujú celkovú funkciu zariadenia. Vzhľadom na funkciu GNSS modulu zariadenie podáva očakávateľné výsledky. Predpoklady na zariadenie, ktoré boli stanovené na konci teoretickej časti boli z hľadiska tohto modulu dosiahnuté. Presnosť v najlepších možných podmienkach je okolo 1 m. Týmto najlepšimi podmienkami sa myslí zameranie stacionárneho bodu alebo pohyb po priamej alebo zakrivenej dráhe rýchlosťou väčšou, než je rýchlosť priemernej ľudskej chôdze. Zariadeniu musí byť po pripojení napájania ponechané v pokoji na približne 2 minúty, aby sa ustálila jeho základná poloha, čím sa potom dosiahne požadovanej presnosti. Pri pohyboch, ktoré za periódu záznamu polohy neprekonajú dráhu, ktorá by bola dlhšia ako nepresnosť zameriavania vzniká nepresnosť merania, ktorá je korigovateľná pomocou senzoru IMU. Podobne aj rýchlejšie zmeny vektoru hybnosti, ktorých frekvencia je väčšia, než frekvencia záznamu dát z GNSS modulu. Strata signálu z družíc pri prekonávaní prekážok alebo vstúpením do tunelu je pochopiteľný dôvod pre stratu trasovania, ktorá by mala byť dočasne nahradzovaná lokálnym zameriavaním zo senzorov. Všetky tieto predpoklady umožňujú spoľahlivú funkciu, ktorá by pri spojení s IMU senzorom mala byť bezchybná.



## 5. ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberala zariadeniami, ktoré zameriavajú polohu a pohyb v priestore. GNSS modul je zariadenie, ktoré dokáže z rôznych satelitných služieb zamerať polohu na planéte. Vyrobené zariadenia používa GNSS modul od firmy Quectel L96, ktorý dokáže prijímať signál zo služieb GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou. Vďaka jeho integrovanej anténe je zariadenie plne funkčné bez ďalších prídavných zariadení. IMU je modul kombinujúci gyroskop, akcelerometer do jedného zariadenia. Použitý bol integrovaný obvod BMX160 od firmy Bosch, ktorý je vyrobený technológiou MEMS a kombinuje okrem spomenutých senzorov aj magnetometer, ktorý slúži ako digitálny kompas. Spracovanie týchto dát a ich kombinácia pomocou numerických metód a matematických filtrov je schopná dávať presné údaje o polohe. Všetky tieto dáta sú spracovávané a ukladané na pamäťovú kartu k ďalšej analýze na počítači. Parametre zariadenia boli overené testami v reálnom prostredí a splňajú očakávania.

V prvej kapitole sa rozobrala teória všetkých technológií, ktoré umožňujú funkciu zariadení. Rozobrala sa funkcia satelitnej navigácie. Porovnali sa jednotlivé služby ako GPS, GLONASS, Galileo a ďalšie v ich presnosti a pokrytí. Popísala sa teória fungovania gyroskopov a akcelerometrov, ktoré fungujú na báze mikročipov typu MEMS. Rozobrali sa možnosti akumulátorového napájania a možnosti ukladania a zdieľania nameraných dát. Boli načrtnuté numerické metódy pre počítanie určitých integrálov, ktorými je možné počítať rýchlosť a polohu z dát o zrýchlení a matematické filtre, ktoré prichádzajúce dáta filtrujú od šumu zlučujú ich.

V druhej kapitole sa z dostupných možností na trhu s komponentmi porovnali a vybrali tie s najvhodnejšími vlastnosťami pre plánované zariadenie. Vybrané komponenty museli byť jednoduché na používanie, mať dostatočné dobré parametre, museli byť dostupné na trhu s dostatočnou dokumentáciou od výrobcu. Posledná vlastnosť sa neskôr ukázala ako kľúčová, pretože celosvetový výpadok výroby integrovaných obvodov ovplyvnil aj dostupnosť komponentu, ktorý je použitý v tomto zariadení. Z vybraných komponentov sa zostavila topografia zariadenia a taktiež tabuľka parametrov, ktoré by malo zariadenie splňovať.

V tretej kapitole sa komponenty prepojili v schematickom návrhu, každá bola zapojená podľa odporúčaní výrobcu v katalógovom liste a boli pripojené na konektory, ktoré sa pripájajú na vývojovú platformu Nucleo. Objednané komponenty a DPS sa osadili a vyskúšalo sa ich základné fungovanie. Z tohto overenia funkcií vznikol riadiaci program v jazyku C, navrhnutý vo vývojovom prostredí CubeMX a CubeIDE. Ten prijíma dáta po sériovej linke UART a SPI, triedi ich, spracováva a ukladá na pamäťovú kartu. Bolo popísané zistenie, prečo integrovaný obvod BMX160 nereaguje na výzvy na vysielanie dát. Bohužiaľ pri osadzovaní musel nastať skrat, ktorý nemohol byť kvôli miniatúrnym rozmerom odhalený opticky. Ten nenávratne poškodil obvod.

Z dôvodov celosvetového nedostatku integrovaných obvodov nebolo možné čip nahradiť a zariadenie dostať do stopercentnej prevádzky.

Posledná kapitola sa zaoberá testovaním vlastností zariadenia. Je navrhnutá séria testov, stacionárnych aj dynamických, ktoré merajú presnosť merania polohy. Dynamické testy sa delia podľa rozsahu rýchlostí, v ktorých môže byť zariadenie použité. Môžu to byť rýchlosti nízke pri chôdzi alebo vysoké pri jazde automobilom. Každé z týchto testov odhaľujú limity komponentov a vysvetľujú ich dôvody.

Diplomová práca splnila zadanie. Zariadenie, ktoré je vyrobené je vhodné na použitie pri ďalšom vývoji v oblasti algoritmov na filtrovanie a zlučovanie vstupných dát z viacerých senzorov. Táto oblasť je dnes kľúčovou pri vývoji zariadení, ktoré majú mať povedomie o svojej polohe a o pohybe v priestore. V budúcnosti bude potrebné, aby každý takýto prístroj vedel, kde sa nachádza v priestore a aký vplyv má jeho pohyb na zmenu polohy, aby neohrozili posádku, obsluhu alebo svoje okolie. Môže sa jednať o autonómne vozidlá, osobné alebo bezpilotné lietacie stroje alebo robotických asistentov. V súčasnej praxi sa okrem vývojových účelov môže zariadenie používať aj ako praktický a spoľahlivý záznamník trasy, ktorý je jednoduchý na užívanie, má dlhú výdrž akumulátoru, nízku cenu a nie je závislý od smartfónu, ktorý sa ani jednou zo spomenutých vlastností nevyznačuje. Vývoj zariadenia bol veľmi prospešný z hľadiska didaktického. Osvetlil princípy satelitnej navigácie a osviežil fungovanie senzorov novej generácie integrovaných do čipu. Naučil ako vytvárať efektívny kód a ako hľadať riešenia na problémy, na ktoré nikto predtým nenarazil. V neposlednom rade dal možnosť vyskúšať si prácu s limitovanými prostriedkami, okliešteným časom na prácu a v náročných podmienkach. Tieto skúsenosti sú tým najcennejším, ktoré môže škola študentovi dať. Pretože v praxi sa človek musí neustále učiť novým technológiám a postupom. Ale aby bol študent úspešný v zamestnaní alebo podnikaní, musí sa hlavne naučiť ako sa učiť rýchlo a efektívne. Táto práca bola vyhotovená počas celosvetovej pandémie, ktorá skomplikovala kooperáciu na vysokých školách aj vo firmách. Prinútila študentov aj pedagógov k lepšiemu manažmentu času na prácu a času na iné aktivity. Zároveň ale ukázala, kam nás môže dostať vôľa posúvať sa ďalej a moderné technológie, ktoré nám uľahčujú a stále viac budú uľahčovať prácu a zefektívňovať aplikáciu našich ideí do praxe.

## LITERATURA

- [1] STEINER, Ivo a Jiří ČERNÝ. GPS od a do z. 4., aktual. vyd. Praha: eNav, 2006, 264 s. : il. ISBN 80-239-7516-1.
- [2] Satellite navigation. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2.12.2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite\\_navigation](https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation)
- [3] Trilateration vs Triangulation: How GPS Receivers Work. GIS Geography [online]. USA, 13.12.2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>
- [4] Global Positioning System. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020, 26.11.2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)
- [5] GLONASS. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 8.12.2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS>
- [6] Galileo (satellite navigation). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 5.12.2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_\(satellite\\_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation))
- [7] BeiDou. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2.12.2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou>
- [8] Indian Regional Navigation Satellite System. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 23.11.2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Indian\\_Regional\\_Navigation\\_Satellite\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Indian_Regional_Navigation_Satellite_System)
- [9] Quasi-Zenith Satellite System. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 6.12.2020 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Zenith\\_Satellite\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Zenith_Satellite_System)
- [10] Quasi-Zenith Satellite System: Performance Standard. Quasi-Zenith Satellite System [online]. Japonsko, 20.8.2020 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/ps-qzss-002.pdf?t=1607714105120>
- [11] Accelerometer. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11.12.2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>
- [12] DIXON-WARREN, J. Motion sensing in the iPhone 4: MEMS accelerometer. MEMS Journal [online]. USA, 2003, 23.12.2010 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.memsjournal.com/2010/12/motion-sensing-in-the-iphone-4-mems-accelerometer.html>

- [13] Gyroscope. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 9.12.2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>
- [14] Inertial measurement unit. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11.12.2020 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial\\_measurement\\_unit](https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit)
- [15] THUILLIER, Jules. Handling IMU Drift. In: VR Tracker [online]. Kanada, 2016, 10.8.2018 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://vrtracker.xyz/handling-imu-drift/>
- [16] LEVEK, Vladimír. Návrh LPM (Low Power Mode) zařízení. ČR, 2018. Dostupné také z: [https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/153294/mod\\_resource/content/2/lowPowerMNEN.pdf](https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/153294/mod_resource/content/2/lowPowerMNEN.pdf)
- [17] How to Choose a MicroController. In: Instructables Circuits [online]. USA, 28.1.2009 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/How-to-choose-a-MicroController/>
- [18] What is the Difference between 8051, PIC, AVR and ARM? In: Elprocus: Electronics|Projects|Focus [online]. India, 2013 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/difference-between-avr-arm-8051-and-pic-microcontroller/>
- [19] Arduino Uno Rev3. In: Arduino [online]. Taliansko [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [20] PIC10F Product Family. In: Microchip Technology Inc. [online]. USA, 1998 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive/motor-control-products/8-bit-mcus/pic10f>
- [21] Raspberry Pi. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 17.12.2020 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)
- [22] CoolRunner-II CPLDs. In: Xilinx [online]. USA [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/cpld/coolrunner-ii.html>
- [23] Log Temperature Sensor Data to Google Sheet using NodeMCU ESP8266. In: Circuit Digest [online]. India, 11.7.2019 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/log-temperature-sensor-data-to-google-sheet-using-nodemcu-esp8266>
- [24] Služby CRA IoT. České Radiokomunikace [online]. ČR, 2019 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.cra.cz/sluzby-iot>
- [25] Numerická integrace. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021, 27.2.2021 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Numerick%C3%A1\\_integrace](https://cs.wikipedia.org/wiki/Numerick%C3%A1_integrace)
- [26] Kalman filter. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021, 19.5.2021 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter)

- [27] Comparison of Attitude and Heading Reference Systems using Foot Mounted MIMU Sensor Data [online]. [cit. 2021-5-23].
- [28] IMU Data Fusing: Complementary, Kalman, and Mahony Filter. *OlliW's Bastelseiten* [online]. Nemecko, 2011, 13.9.2018 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <http://www.olliw.eu/2013/imu-data-fusing/>
- [29] MADGWICK, Sebastian O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Courses from University of Washington Computer Science & Engineering* [online]. USA, 2010, 30.4.2010 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://courses.cs.washington.edu/courses/cse474/17wi/labs/l4/madgwick\\_internal\\_report.pdf](https://courses.cs.washington.edu/courses/cse474/17wi/labs/l4/madgwick_internal_report.pdf)
- [30] SANKET, Nitin J. Mathematical Model of an IMU: Madgwick Filter. *Nitin J. Sanket Github* [online]. USA [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://nitinjsanket.github.io/tutorials/attitudeest/madgwick>
- [31] CIRILLO, Andrea, Pasquale CIRILLO, G. DE MARIA a. CIRILLO, G. DE MARIA a. CIRILLO, G. DE MARIA a. A comparison of multisensor attitude estimation algorithms. *Research Gate* [online]. Nemecko, 2008, September 2016 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/303738116\\_A\\_comparison\\_of\\_multisensor\\_attitude\\_estimation\\_algorithms](https://www.researchgate.net/publication/303738116_A_comparison_of_multisensor_attitude_estimation_algorithms)
- [32] Sebastian O. H. Madgwick. *IEEE Explore* [online]. USA, 28.5.2020 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/author/37946716700>
- [33] Home Page for Robert Mahony. *Home Page for Robert Mahony* [online]. Austrália, 1994 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://users.cecs.anu.edu.au/~Robert.Mahony/>
- [34] Kalman Filter Explained: Example. *Raghavan* [online]. 2015, 14.4.2019 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://medium.com/@raghavan99o/kalman-filter-explained-example-95b3f2d324ee>
- [35] STM32 Nucleo Boards. In: STM Microelectronics [online]. USA [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-nucleo-boards.html>
- [36] NUCLEO-L476RG: STM32 Nucleo-64 development board. In: STM Microelectronics [online]. USA [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.st.com/content/st.com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-nucleo-boards/nucleo-l476rg.html>
- [37] STM32L476RG: Ultra-low-power with FPU Arm Cortex-M4 MCU 80 MHz with 1 Mbyte of Flash memory, LCD, USB OTG, DFSDM. In: STM Microelectronics [online]. USA [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l476rg.html>
- [38] Product Summary: MAX-M8 series. In: U-blox [online]. Švajčiarsko, 2018 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/docs/UBX-16008997>

- [39] NEO-M9N module: Product summary. In: U-blox [online]. Švajčiarsko, 2020 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M9N\\_ProductSummary\\_%28UBX-19027207%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M9N_ProductSummary_%28UBX-19027207%29.pdf)
- [40] Absolute orientation sensor BMX160. *Bosch Sensortec* [online]. Nemecko, 20.4.2021 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/products/motion-sensors/absolute-orientation-sensors/bmx160/>
- [41] Quectel L89. In: Quectel [online]. Čínska ľudová republika, 2019 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: [https://www.quectel.com/UploadFile/Product/Quectel\\_L89\\_GNSS\\_Specification\\_V1.1.pdf](https://www.quectel.com/UploadFile/Product/Quectel_L89_GNSS_Specification_V1.1.pdf)
- [42] Quectel L96. In: Quectel [online]. Čínska ľudová republika, 2017 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: [https://www.quectel.com/UploadFile/Product/Quectel\\_L96\\_GNSS\\_Specification\\_V1.1.pdf](https://www.quectel.com/UploadFile/Product/Quectel_L96_GNSS_Specification_V1.1.pdf)
- [43] BMX160: Data sheet. *Bosch Sensortec* [online]. Nemecko, November 2020 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmx160-ds0001.pdf>
- [44] MPU-9250: Product Specification. *TDK Invensense* [online]. 20.6.2016 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>
- [45] L96 Hardware Design. *Quectel* [online]. Čínska ľudová republika, 20.8.2018 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.quectel.com/product/gnss-l96/>
- [46] *L96 GNSS Protocol Specification*. Čínska ľudová Republika, 2017
- [47] UM1724 User manual: STM32 Nucleo-64 boards (MB1136). *STMicroelectronics* [online]. USA, 20.8.2020 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l476rg.html#documentation>
- [48] RM0351 Reference manual: STM32L47xxx, STM32L48xxx, STM32L49xxx and STM32L4Axxx advanced Arm®-based 32-bit MCUs. *STMicroelectronics* [online]. USA, 25.2.2021 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l476rg.html#documentation>
- [49] FatFs: Generic FAT Filesystem Module. *Electronics Lives Mfg.* [online]. Japonsko [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [http://elm-chan.org/fsw/ff/00index\\_e.html](http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html)
- [50] Lat/Lon Formats and Symbols. *MapTools: Tools for Navigation* [online]. USA [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://www.maptools.com/tutorials/lat\\_lon/formats](https://www.maptools.com/tutorials/lat_lon/formats)
- [51] Level of Resolution of Longitude and Latitude Measurements. *OXTS* [online]. Veľká Británia, 2.5.2021 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://support.oxts.com/hc/en-us/articles/115002885125-Level-of-Resolution-of-Longitude-and-Latitude-Measurements>

# ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

GPS	Global Positioning System (Globálny pozičný systém)
GLONASS	Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema (Globálny navigačný satelitný systém)
CDMA	Code-division multiple access (Kódový multiplex)
FDMA	Frequency-division multiple access (Frekvenčný multiplex)
NavIC	Navigation with Indian Constellation (Navigácia indickou konšteláciou)
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System (Kvazi-zenitový navigačný systém)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Globálny navigačný satelitný systém)
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems (mikromechanické systémy)
IMU	Inertial Measurement Unit (Jendotka merania zotrvačnosti)
Li-Ion	Lítium-iontový akumulátor
Li-Pol	Lítium-polymerový akumulátor
NiCd	Nikel-kadmiový akumulátor
NiMH	Nikel-metalhydridový akumulátor
AVR	Mikrokontrolér od firmy Atmel
PIC	Peripheral Interface Controller
SOP	Small Outline Package (Čipové balenie s malou plochou)
ARM	Advanced RISC Machine
FPGA	Field Programmable Gate Array (Pole logických členov programovateľné užívateľom)
CPLD	Complex Programmable Logic Device (Zložitý programovateľný logický obvod)
ASIC	Application Specific Integrated Circuit (Zákaznícky obvod)
SDHC	Secure Digital High Capacity (druh pamäťovej karty)
SDXC	Secure Digital eXtended Capacity (druh pamäťovej karty)
LoRa	Long Range
3G	skratka third generation (tretia generácia mobilnej siete)
Wi-Fi	Bezdrôtová lokálna sieť
USB	Universal Serial Bus (Univerzálna sériová zbernica)
SRAM	Statická RAM
RAM	Random Access Memory (Pamäť s priamym prístupom)
AD	Analógovo-digitálny
DA	Digitálne-analógový

I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit (sériová zbernica)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (sériová zbernica)
EAGLE	Easily Applicable Graphical Layout Editor (Ľahko aplikovateľný grafický návrhový editor)
MicroSD	Micro Secure Digital (malý formát pamäťovej karty)
LED	Light-emitting diode (Svetlo-emitujúca dioda)
GPIO	General-Purpose Input/Output (Vstupno-výstupné porty pre všeobecné použitie)
E12	Séria preferovaných hodnôt elektronických komponentov, ktorá má 12 hodnôt na jednu dekádu
DPS	Doska plošných spojov
UMEL	Ústav mikroelektroniky FEKT VUT
FR-4	(Fire Retardant) Kompozitný materiál zo sklenených vlákien vystužený epoxidovou živinou, samozhášivý
HAL	Hardware Abstraction Layer (Vrstva pre abstrakciu hardvéru)
FATFS	File Allocation Table File System (Súborový systém s alokačnou tabuľkou súborov)
SDMMC	Komunikačný port pre karty SD a MMC
PC	Personal Computer (Osobný počítač)
NMEA	National Marine Electronics Association (Národná asociácia námornej elektroniky)
ex/FAT/16/32	Varianty súborového systému FAT
FIFO	First In – First Out (Pamäť, ktorá vysiela prvé prijaté dáta ako prvé)
STM32	Rodina mikrokontrolérov od firmy STMicroelectronics
ASCII	American Standard Code for Information Interchange (Americký štandardný kód pre výmenu informácií)
UTC	Coordinated Universal Time (základný svetový čas)

#### Symbols:

$v$	rýchlosť	(m/s, km/h, km/s)
$s$	dráha	(km, m, cm)
$t$	čas	(ns, $\mu$ s, s, min)
$T$	teplota	(°C)
$I$	elektrický prúd	( $\mu$ A, nA, mA)
$f$	frekvencia	(MHz, Hz)
$U$	napätie	(V)
$S_i$	citlivosť	(dB)



$a$	zrýchlenie	(m/s <sup>2</sup> )
$B$	magnetická indukcia	(μT)
$C$	kapacita	(nF, μF)
$R$	elektrický odpor	(Ω)

# **ZOZNAM PRÍLOH**

<b>PRÍLOHA A - NMEA SPRÁVY.....</b>	<b>91</b>
<b>PRÍLOHA B - SCHÉMA ZARIADENIA.....</b>	<b>94</b>
<b>PRÍLOHA C - DOSKA PLOŠNÝCH SPOJOV .....</b>	<b>95</b>
<b>PRÍLOHA D - ZOZNAM SÚČIASTOK.....</b>	<b>97</b>

## Príloha A - NMEA správy

### A.1 Zoznam NMEA správ a ich obsah

Pole	xxRMC	GPVTG	GPGBA	xxGSA	xxGSV	xxGDL
1	UTC čas	Kurz	UTC čas	Mód 2D/3D	Počet GSV správ	Zem. dĺžka
2	Validita dát	,T'	Zem. dĺžka	Status fix.	Číslo poradia	Sever/ Juh
3	Zem. dĺžka	Mag. kurz	Sever/ Juh	Satelit na kanále 1	Viditeľné satelity	Zem. šírka
4	Sever/ Juh	,M'	Zem. šírka	Satelit na kanále 2	Číslo satelitu 1	Východ/ Západ
5	Zem. šírka	Rýchlosť uzle	Východ/ Západ	Satelit na kanále 3	Prevýšenie 1	UTC čas
6	Východ/ Západ	,N'	Status fix.	Satelit na kanále 4	Azimut 1	Validita dát
7	Rýchlosť uzle	Rýchlosť km/h	Počet satelitov	Satelit na kanále 5	Pomer signálu a šumu 1	Pozič. mód
8	Kurz	,K'	Horiz. nepresnosť	Satelit na kanále 6	Číslo satelitu 2	-
9	Dátum	Pozič. mód	Nadm. výška	Satelit na kanále 7	Prevýšenie 2	-
10	Pozič. mód	-	,M'	Satelit na kanále 8	Azimut 2	-
11	Nav. status	-	Výška geoidu	Satelit na kanále 9	Pomer signálu a šumu 2	-
12	-	-	,M'	Satelit na kanále 10	Číslo satelitu 3	-
13	-	-	Vek DGPS dát	Satelit na kanále 11	Prevýšenie 3	-
14	-	-	ID DGPS stanice	Satelit na kanále 12	Azimut 3	-
15	-	-	-	Posič. nepresnosť	Pomer signálu a šumu 3	-
16	-	-	-	Horiz. nepresnosť	Číslo satelitu 4	-
17	-	-	-	Vertik. nepresnosť	Prevýšenie 4	-
18	-	-	-	GNSS sys.	Azimut 4	-

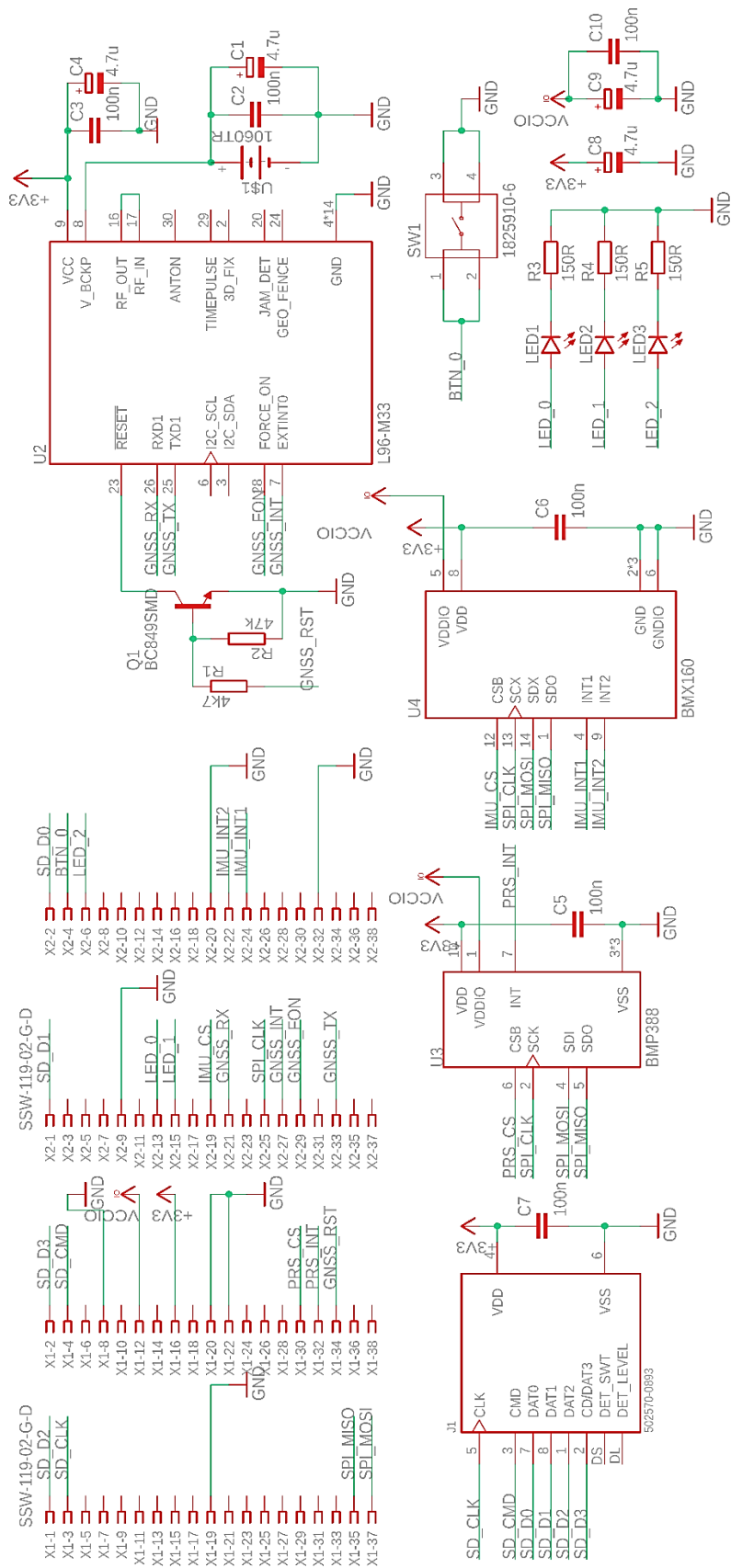
19	-	-	-	-	Pomer signálu a šumu 4	-
----	---	---	---	---	---------------------------	---

## A.2 Zoznam NMEA MTK príkazov

Kód	Popis
010	PMTK_SYS_MSG
011	PMTK_TXT_MSG
001	PMTK_ACK
101	PMTK_CMD_HOT_START
102	PMTK_CMD_WARM_START
103	PMTK_CMD_COLD_START
104	PMTK_CMD_FULL_COLD_START
161	PMTK_CMD_STANDBY_MODE
183	PMTK_LOCUS_QUERY_STATUS
184	PMTK_LOCUS_ERASE_FLASH
185	PMTK_LOCUS_STOP_LOGGER
622	PMTK_Q_LOCUS_DATA
220	PMTK_SET_POS_FIX
223	PMTK_SET_AL_DEE_CFG
225	PMTK_SET_PERIODIC_MODE
251	PMTK_SET_NMEA_BAUDRATE
255	PMTK_SET_SYNC_PPS_NMEA
256	PMTK_SET_TIMING_PRODUCT
285	PMTK_SET_PPS_CONFIG
286	PMTK_SET_AIC_ENABLED
301	PMTK_API_SET_DGPS_MODE
306	PMTK_API_SET_MIN_SNR
308	PMTK_API_SET_DR_LIMIT
311	PMTK_API_SET_ELEV_MASK
313	PMTK_API_SET_SBAS_ENABLED
314	PMTK_API_SET_NMEA_OUTPUT
351	PMTK_API_SET_SUPPORT_QZSS_NMEA
352	PMTK_API_SET_STOP_QZSS
353	PMTK_API_SET_GNSS_SEARCH_MODE
386	PMTK_API_SET_STATIC_NAV_THD
400	PMTK_API_Q_FIX_CTL
401	PMTK_API_Q_DGPS_MODE
413	PMTK_API_Q_SBAS_ENABLED

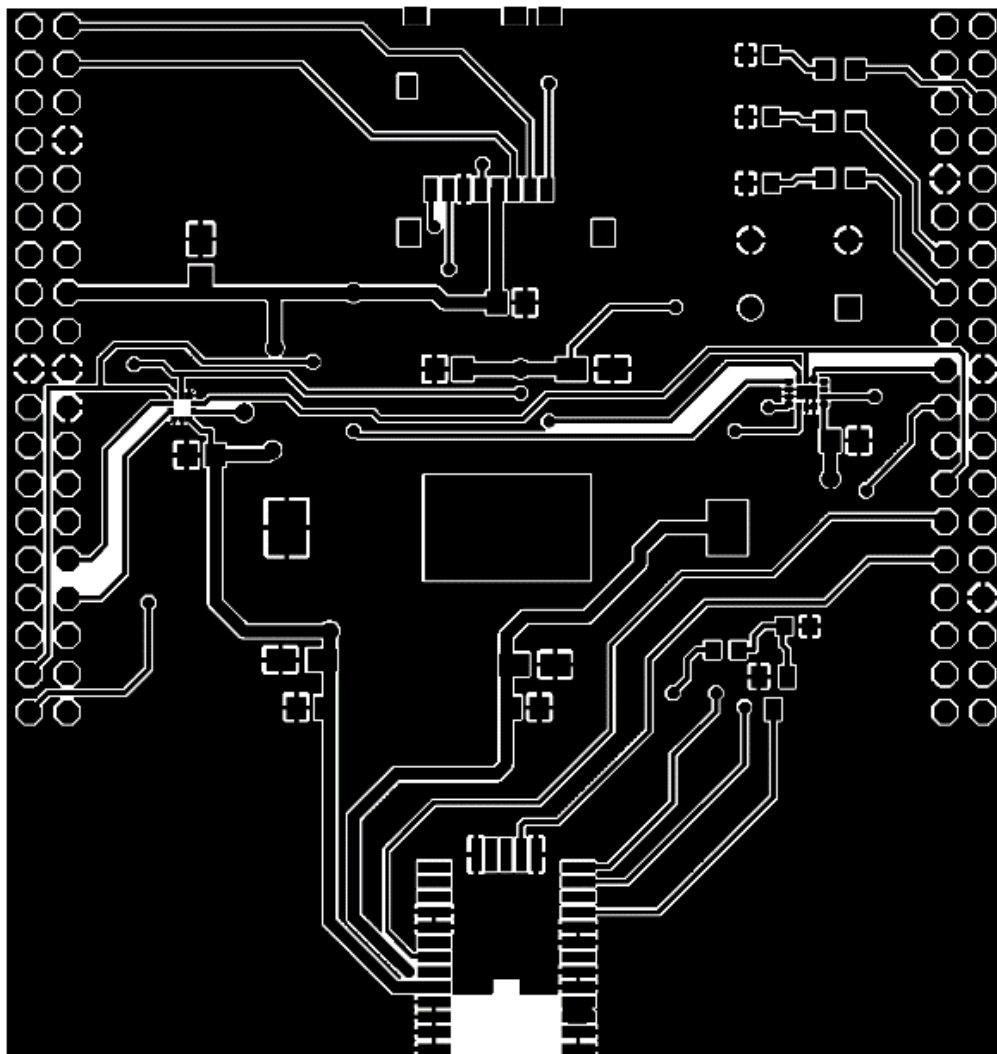
414	PMTK_API_Q_NMEA_OUTPUT
458	PMTK_API_GET_POS_XYZ
461	PMTK_API_GET_VEL_XYZ
605	PMTK_Q_RELEASE
500	PMTK_DT_FIX_CTL
501	PMTK_DT_DGPS_MODE
513	PMTK_DT_SBAS_ENABLED
514	PMTK_DT_NMEA_OUTPUT
705	PMTK_DT_RELEASE
838	PMTK_TEST_ANTI_SPOOFING
869	PMTK_EASY_ENABLE
875	PMTK_PMTKLSC_STN_OUTPUT
886	PMTK_FR_MODE

## Príloha B - Schéma zariadenia



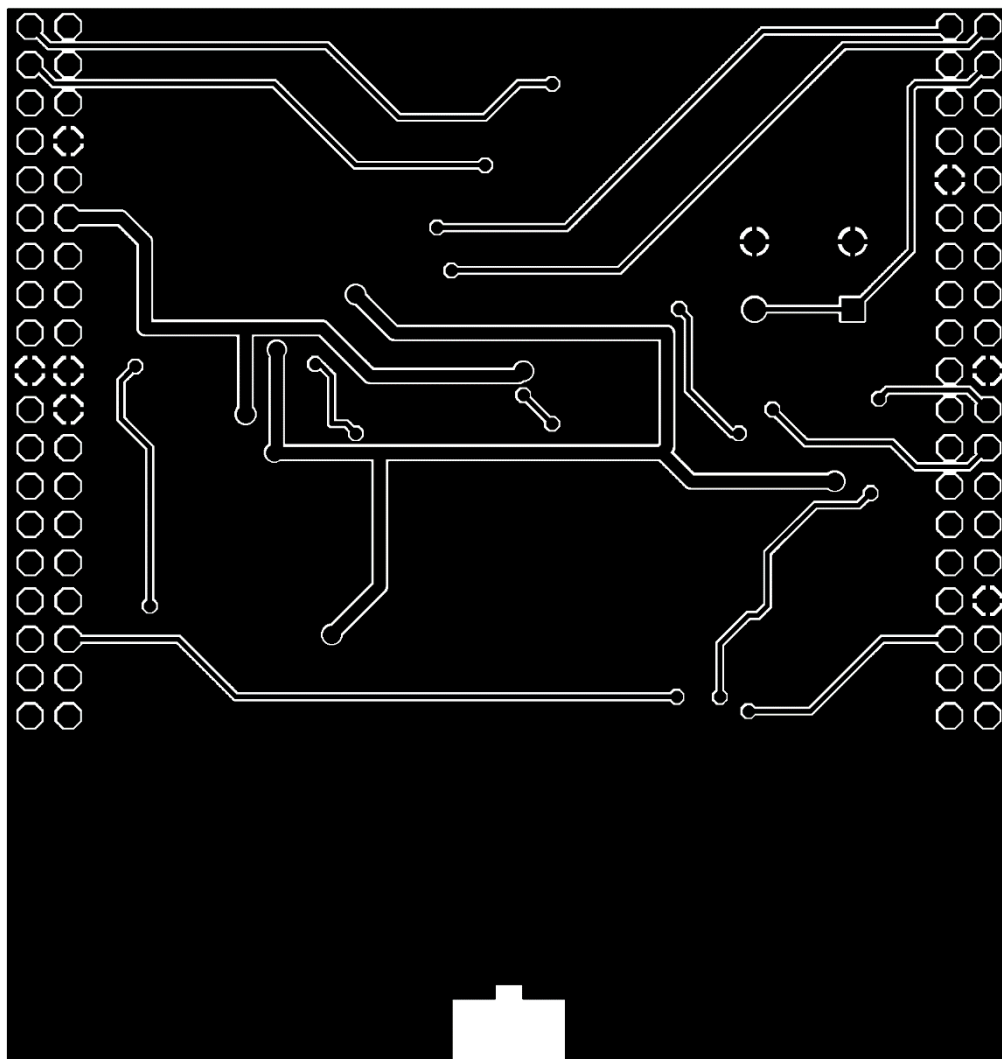
## Príloha C - Doska plošných spojov

### C.1 Top (vrchná strana)



Rozmer dosky 68,58 x 72,06 [mm] v mierke M2:1

## C.2 Bottom (spodná strana)



Rozmer dosky 68,58 x 72,06 [mm] v mierke M2:1



## Príloha D - Zoznam súčiastok

Označenie	Hodnota/model	Puzdro	Popis
C1	4.7u	3216	Kondenzátor tantalový SMD
C2	100n	0805	Kondenzátor keramický SMD
C3	100n	0805	Kondenzátor keramický SMD
C4	4.7u	3216	Kondenzátor tantalový SMD
C5	100n	0805	Kondenzátor keramický SMD
C6	100n	0805	Kondenzátor keramický SMD
C7	100n	0805	Kondenzátor keramický SMD
C8	4.7u	3216	Kondenzátor tantalový SMD
C9	4.7u	3216	Kondenzátor tantalový SMD
C10	100n	0805	Kondenzátor keramický SMD
J1	502570-0893	-	Slot na MicroSD kartu
LED1	-	0805	LED SMD zelená
LED2	-	0805	LED SMD zelená
LED3	-	0805	LED SMD zelená
Q1	BC849	SOT23	NPN Tranzistor
R1	4k7	0603	Odpor SMD
R2	47k	0603	Odpor SMD
R3	150R	0603	Odpor SMD
R4	150R	0603	Odpor SMD
R5	150R	0603	Odpor SMD
SW1	1825910-6	-	Mikrospínač
U1	1060TR	-	Držiak na batériu CR2025, CR2032
U2	L96	-	GNSS modul
U3	BMP388	-	MEMS Barometer
U4	BMX160	-	MEMS 9-osí IMU
X1	SSW-119-02-G-D	-	Dutinková lišta 2x19
X2	SSW-119-02-G-D	-	Dutinková lišta 2x19